T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

NiTiHf BAZLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN TERMODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Hazırlayan
Musa ÇALIŞKAN

Danışman
Doç. Dr. Emre ACAR

Yüksek Lisans Tezi

Mayıs 2018
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

NiTiHf BAZLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN TERMODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Musa ÇALIŞKAN

Danışman
Doç. Dr. Emre ACAR

Mayıs 2018
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Musa ÇALIŞKAN



YÖNERGEYE UYGUNLUK

"NiTiHf Bazlı Şekil Hafızalı Alaşımların Fonksiyonel Özelliklerinin Termodinamik Açıdan İncelenmesi" adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan
Musa ÇALIŞKAN

Danışman
Doç. Dr. Emre ACAR

Sivil Havacılık Anabilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. İlker YILMAZ

Doç. Dr. Emre ACAR danışmanlığında **Musa ÇALIŞKAN** tarafından hazırlanan **"NiTiHf Bazlı Şekil Hafızalı Alaşımların Fonksiyonel Özelliklerinin Termodinamik Açıdan İncelenmesi"** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Sivil Havacılık** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

Gün / Ay / Yıl
15/05/2018

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Emre ACAR

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Murat AYDIN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Burak BAL

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 22/05/2018. tarih ve 2018/22-30 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

22 / 05 / 2018

Prof. Dr. Mehmet AKKURT
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Son yıllarda şekil hafızalı alaşımların özelliklerinin daha iyi kavranması ile ülkemizde çalışmalar hızlı bir şekilde devam etmektedir. Bu çalışmamızda NiTi bazlı şekil hafızalı alaşımların yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme potansiyeli araştırılmıştır. NiTiHf alaşım sistemine % 5 Pd eklenerek elde edilen fonksiyonel özellikler termodinamik açıdan değerlendirilmiştir.

Bu çalışmamda bana her zaman destek olan, engin bilgi ve tecrübesini esirgemeyen, çalışmaktan keyif aldığım çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Emre ACAR' a sonsuz teşekkür ederim.

Yaşamın her alanında olduğu gibi bu çalışmamda bana destek veren değerli aileme ve yakın arkadaşlarıma da en içten teşekkürlerimi sunarım.

Musa ÇALIŞKAN

Kayseri, Mayıs 2018

NiTiHf BAZLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN TERMODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

Musa ÇALIŞKAN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 2018
Danışman: Doç. Dr. Emre ACAR

ÖZET

Şekil hafızalı alaşımlar sıcaklık, basınç ve manyetik etki yoluyla değişen şeklini geri kazanabiliyor olmasından ötürü günümüzde yoğun şekilde dikkat çekmektedir. Başlıca havacılık, uzay, elektronik, sağlık, otomotiv alanında kullanıldıkları gibi gelecekte de daha birçok mühendislik uygulamalarında geniş yer bulacağı düşünülmektedir. NiTiHf bazlı alaşımlar hem yüksek sıcaklık hem de yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılabilme potansiyeline sahip ender akıllı malzemelerdir. Bu tür malzemeler yüksek güç üretimi, portatiflik gibi faydalarının yanında maliyet ve ağırlık tasarrufu sağladıkları için daha çok tercih edilmeye başlamıştır.

Bu tez çalışmasında, öncelikle NiTi başta olmak üzere şekil hafızalı alaşımlar, faz dönüşümleri, mikroyapıları, şekil hafıza olayı dikkate alınarak detaylı olarak açıklanmış ve aynı zamanda termodinamik özellikleri denklemlerle açıklanmıştır. Deneysel kısımda ise NiTiHf esaslı alaşım sistemine % 5 oranında Pd elementinin eklenmesi ile elde edilen NiTiHfPd şekil hafızalı alaşımları incelenmiştir. DSC (diferansiyel taramalı kalorimetre) cihazı ile yapılan ölçümler ile ısıl işleme tabi tutulmuş NiTiHfPd alaşımının faz dönüşüm özellikleri ve faz dönüşüm enerjileri termal çevrim sayısının ve ısıtma/soğutma hızlarının fonksiyonu olarak incelenmiştir.

Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda faz dönüşüm sıcaklıklarının ve termal histerezis değerinin ısıtma/soğutma hızı ve çevrim sayısıyla değiştiği gözlenmiştir. Tüm çevrim hızları için 80 °C' nin üzerinde dönüşüm sıcaklıkları elde edilmiştir. Bu sayede NiTiHfPd şekil hafızalı alaşımlarının özellikle havacılık ve petrol endüstrisinin ihtiyacı olan sıcak bölge uygulamalarında kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Şekil hafızalı alaşımlar, Martenzit, Termodinamik

THERMODYNAMIC INVESTIGATION OF THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF NiTiHf BASED SHAPE MEMORY ALLOYS

Musa ÇALIŞKAN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, May 2018
Thesis Advisor: Assoc. Prof. Emre ACAR

ABSTRACT

Shape memory alloys are intensely paid attention owing to their ability to recover their deformed shapes by appliying temperature, forve and magnetic field. They are used in many fields including mainly aviation, aerospace, electronics, health and automotive while these enginering fields are predicted to be increased in future. NiTiHf alloys are unique materials that have potential of being used in high temperature or high strength environments. These kinds of materials have been preferred more and more since they have benefits such as savings on weight and expense besides compatibility with high power and portability.

In the initial part of this study, primarily NiTi shape memory alloys are documented in detail in terms of phase transformation, microstructure, shape memory properties besides main thermodynamic theories to explain the phase transformation characteristics of shape memory alloys. NiTiHfPd shape memory alloys, which are produced by adding 5% Pd element to NiTiHf alloy system, are researched in this study. Phase transformation properties and energies of an aged NiTiHfPd alloys are measured by DSC (differential scanning calorimetry) device and examined as functions of thermal cycling and heating/cooling rate.

In consequence of experiments and examinations, it was found that phase transformation temperatures and thermal hysteresis values change by means of heating/cooling rate and number of thermal cycles. Transformation temperatures over 80 °C are obtained for all numbers of cycles. Thus, it was concluded that NiTiHfPd alloys are potential candidates to be used in aerospace and oil-gas industries where high temperature operation capabilities are required.

Keywords: Shape memory alloys, Martensite, Thermodynamic

İÇİNDEKİLER

NiTiHf BAZLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİNİN TERMODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK i
YÖNERGEYE UYGUNLUK ii
ONAY iii
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR iv
ÖZET v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xiii
KISALTMALAR VE SİMGELER xii
GİRİŞ 1

BÖLÜM 1

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Şekil Hafızalı Alaşımlarda Faz Dönüşümü 5
1.2. Kronolojik Sırayla Önceki Çalışmalar 13

BÖLÜM 2

ŞEKİL HAFIZA OLAYI ve KULLANILDIĞI ALANLAR

2.1. Şekil Hafızalı Alaşımların Mikroyapıları ve Şekil Hafıza Olayı 19
2.1.1. Şekil Hafızalı Alaşım Türleri 21
2.2. Süperelastiklik Özelliği 22
2.3. NiTi-X Alaşımları (X Alaşım Elementi) 27
2.4. Şekil Hafızalı Alaşımların Kullanıldığı Alanlar 32
2.4.1. Endüstriyel Uygulama Alanları 32
2.4.2. Tıp ve Medikal Uygulama Alanları 42
2.4.3. Havacılık ve Uzay Teknolojisi Uygulama Alanları 49

BÖLÜM 3

TERMODİNAMİĞİN ŞEKİL HAFIZAYA ETKİSİ

3.1. Şekil Hafıza Özelliklerinin Termodinamiği 54

3.1.1. Elastik Enerji **57**
3.1.2. Tersinir Olmayan Enerji **59**
3.1.3. Faz Dönüşümlerinin Termodinamik ile İfade Edilmesi **60**

BÖLÜM 4

DENEYSEL YÖNTEM

4.1. Deneysel Çalışma **63**

BÖLÜM 5

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Tartışma **66**
5.1.1. Faz Dönüşüm Sıcaklıkları **66**
5.1.2. Faz Dönüşüm Enerjileri **74**
5.2. Sonuç ve Öneriler **79**
KAYNAKLAR **81**
ÖZGEÇMİŞ **90**

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Farklı aktivasyon gerilmesi ve gerinimini gösteren malzemeler 3

Şekil 1.1. Difüzyonsuz dönüşümün gösterimi. (a) yapının ilk durumu, (b) deformasyon sonucu kafes yapısındaki değişiklik, (c) deformasyonun artması sonucu yapıdaki değişim 5

Şekil 1.2. Difüzyonlu dönüşüm. (a) difüzyonlu dönüşüm öncesi yapı, (b) atomlar arasındaki bağların koparak yeni bağların oluşması, (c) difüzyonlu dönüşüm sonrası yapı 6

Şekil 1.3. Kayma türü yapı bozukluğu 7

Şekil 1.4. İkizlenme türü yapı bozukluğu 7

Şekil 1.5. Fazların serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi. Belli sıcaklıkta en düşük serbest enerjiye sahip faz, kararlı faz olmaktadır 8

Şekil 1.6. Şekil hafızalı alaşımlarda temel özelliklerin şematik ile gösterimi 9

Şekil 1.7. Martenzit ve östenit fazlarının mikroyapıda aynı anda görünümü 10

Şekil 1.8. Şekil hafızalı alaşımların şekil hafıza etkisi eğrisi 11

Şekil 2.1. NiTi alaşımına ait termal analiz (DSC) sonucu. 19

Şekil 2.2. Martenzit ve Östenit yapıların birim hücre görünümü 20

Şekil 2.3. Şekil hafıza olayında dönüşümün mikro yapı mekanizması 20

Şekil 2.4. Farklı termal çevrimlerden sonra $Ni_{24}Mn_{25}Ga_{21}$ alaşımının DSC eğrileri 21

Şekil 2.5. (a) Tek yönlü şekil hafızalı alaşım, (b) İki yönlü şekil hafızalı alaşım 22

Şekil 2.6. Tipik bir şekil hafızalı alaşımda gerilme-gerinim diyagramı 23

Şekil 2.7. Şekil hafızalı alaşımlarda östenit dönüşüm oranı-sıcaklık grafiği 23

Şekil 2.8. Farklı sıcaklıklarda dönüşüme ilişkin gerilme-gerinim eğrileri. (a) geleneksel davranış, (b) süperelastik davranış, (c) şekil hafızalı davranış 24

Şekil 2.9. Alaşımın elastiklik modülü - sıcaklık diyagramı 25

Şekil 2.10. NiTi alaşımlarının gerilme – birim şekil değiştirme diyagramları 26

Şekil 2.11. NiTi alaşım sistemi faz diyagramı 28

Şekil 2.12. NiTi alaşım sisteminde dönüşüm sıcaklıklarının Ni oranına göre değişimi 29

Şekil 2.13. NiTi alaşımının sabit yük altında şekil hafıza etkisi 29

Şekil 2.14. Hf ve Zr elementlerinin dönüşüm sıcaklıkları üzerindeki etkisi 30
Şekil 2.15. NiTiHfPd alaşımlarının sabit yük altında şekil hafıza etkisi 31
Şekil 2.16. NiTi-bazlı farklı alaşım sistemlerinin iş üretme kapasiteleri 32
Şekil 2.17. Bulunduğu ortamın sıcaklığına göre kapanıp açılan sera pencere sistemi 33
Şekil 2.18. Çıkış sıcaklığı ayarlanabilir akışkan sıvı valfi 34
Şekil 2.19. Shinkansen Nozomi-700 hızlı treninin fotoğrafı 34
Şekil 2.20. Otomatik yağ seviyesi ayarlama parçası 35
Şekil 2.21. Otomatik yağ seviyesi ayarlama parçasının kullanıldığı dişli kutusu 35
Şekil 2.22. Metal Boru Bağlantıların Kaynaksız Birleştirilmeleri 36
Şekil 2.23. NiTiNol bağlantı elemanı 36
Şekil 2.24. Sıçratma yöntemi kullanılarak elde edilen NiTi ince film 37
Şekil 2.25. NiTi alaşımın superelastik özelliği kullanılarak üretilen cep telefonu anteni 37
Şekil 2.26. NiTi şekil hafızalı alaşım kullanılarak geliştirilmiş mikro tutucu 38
Şekil 2.27. Otomobillerde kullanılan şekil hafızalı aktüatörlerin potansiyel uygulamaları 38
Şekil 2.28. Otomobillerde kullanılan elektrikli potansiyel şekil hafızalı aktüatörler 39
Şekil 2.29. Heykeltraş Olivier Deschamps tarafından yapılan kadın ve bebek figürü 39
Şekil 2.30. NiTi alaşımların hareketlendirici olarak kullanıldığı mikro robot 40
Şekil 2.31. Şekil hafızalı alaşımların kullanıldığı mikro robotun hareketi 40
Şekil 2.32. NiTi yayların kullanıldığı altı bacaklı robotik yengeç 41
Şekil 2.33. NiTi teller kullanılarak tasarlanan Squito robot böcek 41
Şekil 2.34. NiTi şekil hafızalı teller kullanılarak geliştirilen Hitachi robot el 42
Şekil 2.35. Damar tıkanıklığında kullanılan NiTi stent örnekleri 42
Şekil 2.36. Tıkanık olan damarın NiTi stentle açılması 43
Şekil 2.37. Beyin cerrahinde NiTi şekil bellekli spatulanın kullanılışı 43
Şekil 2.38. Beyin cerrahinde kullanılan NiTi şekil bellekli spatula 43
Şekil 2.39. Medikal uygulamalarda kullanılan kateterler için süperelastik klavuz tel 44
Şekil 2.40. NiTi şekil hafızalı alaşımların ortopedik kullanımı 44

Şekil 2.41. Kırık kemiklerin birleştirmede kullanılan NiTi bağlantı plakaları 45
Şekil 2.42. Ortopedik zımba telleri 45
Şekil 2.43. Şekil hafızalı kemik plakaları: (a) Bir insan çenesine tutturulmuş plaka (b) Plaka ve vida detayı 45
Şekil 2.44. NiTi çubuk uygulaması 46
Şekil 2.45. NiTi şekil hafızalı çubukların vertebral uygulaması 46
Şekil 2.46. Ortodontide NiTi diş teli örnekleri ve uygulaması 47
Şekil 2.47. NiTi diş teli uygulaması 47
Şekil 2.48. Endodontik uygulamalarda kullanılan NiTi döner kök kanalı aleti 48
Şekil 2.49. Endodontide kullanılan döner kanal aletleri 48
Şekil 2.50. NiTi' den yapılmış gözlük çerçevesi ve süperelastiklik özelliği 48
Şekil 2.51. Şekil hafızalı alaşımlar sayesinde içe bükülmeye zorlanan değişken geometrili çevron 49
Şekil 2.52. NiTi şekil hafızalı alaşımın hidrolik boru bağlama bileziği olarak kullanılması 50
Şekil 2.53. Şekil hafızalı malzemeden yapılan kuyruk kanatçığı 50
Şekil 2.54. Winglet 51
Şekil 2.55. Modern uçaklarda kullanılan winglet 51
Şekil 2.56. Düz kanat yapısına kıyasla winglet kullanımının etkisi 52
Şekil 2.57. Akıllı kanat 52
Şekil 2.58. Hubble uzay teleskopunun güneş panelleri açık-kapalı iken görüntüsü 53
Şekil 3.1. Sabit gerilme altında ısıtma-soğutma ile elde edilen şekil hafıza etkisinin şematik gösterimi 55
Şekil 3.2. Süperelastik davranış deneyinde elastik enerjinin gösterimi 58
Şekil 3.3. Elastik enerjinin martenzit hacim oranına göre değişimi 58
Şekil 3.4. Tersinir olmayan enerjinin martenzit hacim oranına göre değişimi 60
Şekil 4.1. Düşük hızlı abrasif kesme cihazı 63
Şekil 4.2. Perkin-Elmer Pyris 1 DSC 64
Şekil 4.3. DSC eğrisi ve eğri üzerinde faz dönüşüm sıcaklıkları, histerezis değerleri ve dönüşen fazların temsili gösterimi 64
Şekil 5.1. DSC ile 40 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları 66
Şekil 5.2. DSC ile 60 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları 67

Şekil 5.3. DSC ile 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları 67
Şekil 5.4. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları (not: eğriler birinci ısıl çevrimlere aittir) 68
Şekil 5.5. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları 68
Şekil 5.6. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları 69
Şekil 5.7. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları 70
Şekil 5.8. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları 71
Şekil 5.9. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deneylerde termal histeresis ve çevrim sayıları 71
Şekil 5.10. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları 74
Şekil 5.11. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları (S: Sürtünme (irreversible), Ç: Çekirdeklenme (Nucleation), I: İlerleme (Propogation)) 76
Şekil 5.12. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları 77
Şekil 5.13. DSC ile 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçlarından hesaplanan faz dönüşüm enerjilerinin çevrim sayısı ile değişimi 78

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. Ticari NiTi alaşımlarının bazı özellikleri.....12
Tablo 5.1. Isıtma/Soğutma hızına bağlı olarak dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametreler.....76
Tablo 5.2. Isıtma/Soğutma hızına bağlı olarak dönüşüm enerjileri (ikinci çevrim kullanılmıştır).....78

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	**Anlamı**
Aktüatör	Hareket Ettirici
% ağ.	Yüzde ağırlıkça
vb.	ve benzeri
M_s	Martenzit Başlangıç Sıcaklığı
M_f	Martenzit Bitiş Sıcaklığı
A_s	Östenit Başlangıç Sıcaklığı
A_f	Östenit Bitiş Sıcaklığı
Nitinol	Nikel Titanyum Naval Ordance Labaratuar
R-faz	Ara faz, geçiş fazı
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
°C	Celsius, Santigrat
T	Sıcaklık
T_o	Termodinamik denge sıcaklığı
ΔT	Sıcaklık aralığı
η_T	Dönüşüm sıcaklık histerezisi
G	Gibbs serbest enerji
ΔG	Gibbs serbest enerji değişimi
ΔG_{el}	Geri kazanılabilir elastik Gibbs serbest enerji
ΔG_{irr}	Geri kazanılamayan Gibbs serbest enerji, sürtünme enerjisi
ΔG_{el}^{n}	Çekirdeklenme enerjisi
ΔG_{el}^{p}	İlerleme enerjisi
H	Entalpi
ΔH	Entalpi Değişimi
S	Entropi
ΔS	Entropi Değişimi
ε	Şekil değişimi
K	Sabit
w	Birim şekil değişimi katkısı

$\dot{T}$	Isıtma/soğutma hızı
Ni	Nikel
Ti	Titanyum
Hf	Hafniyum
Pd	Paladyum
Cu	Bakır
Co	Kobalt
Al	Alüminyum
Zr	Zirkonyum
Mn	Mangan
V	Vanadyum
Pt	Platin
NiTi	Nikel Titanyum
NiAl	Nikel Alüminyum
Fe-C	Demir Karbon
CuZn	Bakır Çinko
CuSn	Bakır Kalay
FePd	Demir Paladyum
AuCd	Altın Kadmiyum
MnCu	Mangan Bakır
MnPt	Mangan Platin
AgCd	Gümüş Kadmiyum
NiTiHf	Nikel Titanyum Hafniyum
NiTiPd	Nikel Titanyum Paladyum
NiTiCu	Nikel Titanyum Bakır
NiTiZr	Nikel Titanyum Zirkonyum
NiTiPt	Nikel Titanyum Platin
NiMnGa	Nikel Mangan Galyum
CuAlNi	Bakır Alüminyum Nikel
FeMnSi	Demir Mangan Silisyum
NiTiHfPd	Nikel Titanyum Hafniyum Paladyum
NiTiHfCu	Nikel Titanyum Hafniyum Bakır

GİRİŞ

Geleneksel metallerin aksine şekil hafızalı alaşımlar, toparlanabilir katı faz dönüşümü özellikleri sayesinde günümüzde yoğun olarak bilim insanlarının ve endüstrinin dikkatini çekmekte ve gelecekte de mühendislik uygulamaları için önemli bir yere sahip olacağı düşünülmektedir. Bu özgün metalik malzemelerin başlıca kullanım alanları havacılık, elektronik, sağlık, uzay, otomobil, enerji ve inşaat olarak sıralanabilir [1-2]. Bununla beraber sismik enerjiyi yutabilme özelliklerinden dolayı deprem araştırmacıları için de önemli bir alaşım grubudur [3]. Şekil hafızalı alaşımların temel karakteristik özellikleri şekil hafıza etkisi ve süperelastik etki olarak ikiye ayrılır. Şekil hafıza etkisi, yüksek deformasyon oranlarından (% 10-15) sonra bile malzemenin ısıtma yardımı ile toparlanması olarak açıklanabilir. Özellikle aktüatör, conta ya da yenilenebilen sistem uygulamaları için hayati bir özelliktir [2]. Süperelastik özellik ise malzemelerin kuvvet ya da manyetik etki yardımı ile kristal yapısının değişmesi (katı faz dönüşümü) ve bunun sonucunda yüksek deformasyonlara ulaşılması ve bu deformasyonların etken kuvvetin kaldırılması ile orijinal haline geri gelmesidir [2]. Bahsedilen iki özellikte de deformasyonun geri kazanımının ana nedeni, alaşım içinde gerçekleşen tersinir katı faz dönüşümleridir. Süperelastik davranışta faz dönüşümünü sağlayan sürücü/itici etkisi uygulanan kuvvet, şekil hafıza etkisinde ise faz dönüşümünün sürücü etkisi sıcaklıktır [1].

Şekil hafızalı alaşımların en karakteristik özelliği, dönüşüm sıcaklığının üst ve alt bölgelerinde iki farklı şekle ve kristal yapıya sahip olmasıdır. Daha çok düşük sıcaklıklarda deformasyona uğratılan bu malzemeler, daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında ilk şekillerine dönebilme özelliği gösterirler [3].

Şekil hafızalı alaşımlar sadece ısıtmaya maruz kaldığında ‘tek yönlü şekil hafıza etkisi gösteren malzemeler’, yeniden soğutma işlemi uygulandığında ise ‘iki yönlü şekil hafıza etkisi gösteren’ malzemeler olarak tanımlanır [4].

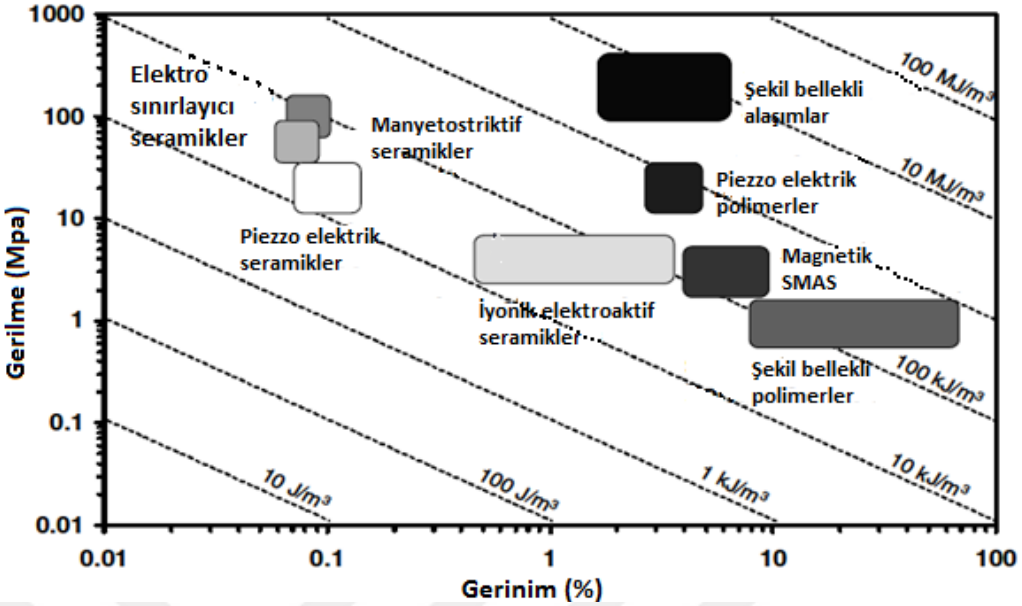
Kontrol sistemi barındıran ve aşırı parça ve bileşenden oluşan karmaşık sistemlere yalnız belli bellek eğitiminden geçmiş ve uygun olarak dizayn edilmiş şekil hafızalı alaşımlar, dayanıklıklarının yüksek, hafif, tok ve elastikliğe sahip olmalarından ötürü alternatif olmaktadır [5].

Şekil hafızalı alaşımların araştırmalar sonucunda üstün özellikleri keşfedilmiş ve bu durum endüstrinin gelişmesine oldukça katkı sağlamıştır. Şekil hafızalı alaşımların deforme edildikten sonra eski şekillerine dönebilmelerinin yanında bu faz geçişleri esnasında ürettiği güç/ağırlık oranının diğer iletim metotlarından büyük olması endüstriye yeni bir bakış kazandırmıştır [6]. Şekil hafızalı alaşımlar elektrik bağlantıları, gözlük çerçevesi, cep telefonu antenleri, hidrolik borularının birleştirilmesinde, havacılık ve uzay sektöründe, tıpta, otomotiv sektöründe ve birçok endüstriyel alanda geniş çapta yer bulmaktadır. Buna ek olarak, robotikte de son yıllarda yaygın hale gelmektedir [5].

Şekil hafızalı alaşımlar endüstri ve makineli aletlerle çalışılan alanlarda yoğun olarak tercih edilirler. Bu malzemeler sıcaklıkla mekaniki davranış gösterdikleri için ısıyı hissettiklerinde etkiye karşı tepki veren sensörler olarak kullanılırlar [7].

Hafif, dayanıklı hem de iyi bir güç/ağırlık oranına sahip olan şekil hafızalı alaşımların havacılık sektöründe mevcut sistemlerle başa çıkılamayan birçok problemin çözümünde yararlı olacağı düşünülmektedir. Havacılıkta şekil hafızalı alaşımların kullanılması planlanan yerlerden biri yer uçuş kumanda yüzeyleridir. Mevcut aktüatör ile çalışan kumanda yüzeylerinin yerine, kanadın devamı olarak gelecek olan kontrol yüzeylerinin kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Bu neticeyle aerodinamik kayıplardan kaçınılarak daha yüksek performansa ulaşılacaktır. Bundan sonraki aşama ise tamamen akıllı malzemeden yapılmış kanatlar olacaktır. Bu sayede en verimli kanat profiline ulaşılmış, aerodinamik kayıplar minimize edilmiş olacaktır. Helikopterdeki rotor titreşimi, gürültü ve havanın etkisiyle oluşan kayıplar, şekil hafızalı alaşımların kullanımıyla çözülebilir [8].

Şekil 1’ de farklı yapıdaki malzemelerin gerilme-gerinim grafikleri ve güç üretebilme kapasiteleri verilmiştir. Bu grafikten de anlaşıldığı gibi şekil hafızalı (bellekli) alaşımlar yüksek gerilme altında yüksek deformasyon gösterebilen ve buna bağlı olarak yüksek güç üretebilme kapasiteleri olan nadir malzemeler olarak görülmektedir.



Şekil 1. Farklı aktivasyon gerilmesi ve gerinimini gösteren malzemeler [9]

AuCd (altın-kadmiyum) alaşımına yapılan ısıl işlem çevrimleri sonucu büyük oranda değişiklik gösteren şekil değişimi incelendiğinde, değişikliğin belli sıcaklık aralıklarında olduğu saptanmıştır. Bu özellik başka alaşımlarda saptandığı gibi özellikle nikel-titanyum alaşımlarında görülmüştür. Bunlara yüksek derecede plastik deformasyon uygulandığında ilk şekline geri dönebildiği gözlenmiştir. Bu durum şekil hafıza olayını ortaya çıkarmıştır [1].

Yüksek sıcaklık fazında belli bir kristal yapıda bulunan malzemenin sıcaklık, basınç veya farklı bir etki ile daha düşük sıcaklıktaki farklı bir kristal yapıya dönüşmesine faz dönüşümü denir. Difüzyonlu ve difüzyonsuz faz dönüşümleri olarakta ikiye ayrılırlar. Sistem içinde atomlar gelişigüzel yer değiştiriyorsa buna ‘difüzyonlu faz dönüşümü’ denir, fakat atomların birbirine olan komşulukları değişmiyor sadece kristal yapıda değişim söz konusu ise bu dönüşümlere ‘difüzyonsuz faz dönüşümü’ denir [10].

Faz dönüşümlerine ait ilk gözlemler demir esaslı alaşımlarda 1864 yılında Sorby, 1866 yılında Tschernoff ve 1878 yılında ise Martens tarafından yapılmıştır. 1895 yılında Osmond, Martens’in tarifine uygun bir gözlem yapmış ve elde ettiği ürün fazına Martenzit, bunun yüksek sıcaklık fazına Östenit, dönüşüme de Martenzitik Faz Dönüşümü adını vermiştir [11-12]. Malzeme içyapılarında oluşan değişmelerin anlaşılmasına öncülük eden ve katıhâl fiziği ile fiziksel metalurjide büyük önemi olan martenzitik faz dönüşümü, ilk olarak Alman fizikçi Adolph Martens tarafından

gözlenmiştir. Bu dönüşüm daha sonraları pek çok kez araştırılmış ve demir esaslı alaşımların yanında metalik özellik göstermeyen bazı malzemelerde de görülmüştür. [11, 12].

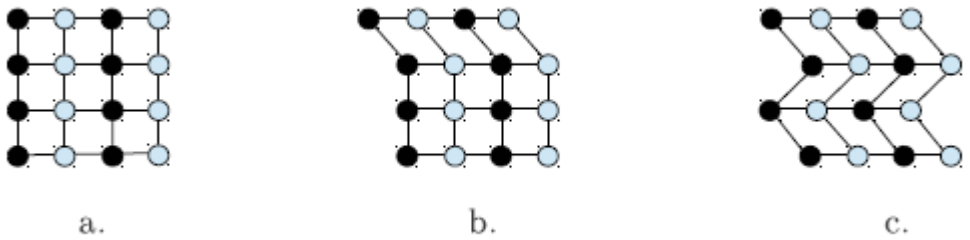
NiTi alaşımları şekil hafıza özelliği göstermektedir. NiTi alaşımları, malzemenin soğutulması ile östenit fazından martenzit fazına dönüşür. M_s sıcaklığı martenzitik dönüşümün başladığı sıcaklık, M_f sıcaklığı ise martenzitik dönüşümün tamamlandığı sıcaklıktır. Benzer olarak A_s ve A_f sıcaklıkları östenitik dönüşümün başladığı ve bittiği sıcaklıklardır. Genel itibariyle bu dönüşüm martenzitik dönüşüm olarak isimlendirilmektedir. [13].

BÖLÜM 1
GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Şekil Hafızalı Alaşımlarda Faz Dönüşümü

Bir malzeme içerisinde atom dizilişleri ve özellik olarak kendi içinde homojen olan, fiziksel olarak da malzemenin diğer kısımlarından ayrılan her bölgeye ‘faz’ denir. Malzeme yapısında belli fazda oluşan denge yapısının, farklı bir fazda oluşan denge yapısına geçmesine ise ‘faz dönüşümü’ adı verilir. Malzeme içinde oluşan sıcaklık değişimleri, yapı kusurları, mekanik gerilmeler veya dışarıdan gelen etkilerde faz dönüşümüne sebep olurlar [14].

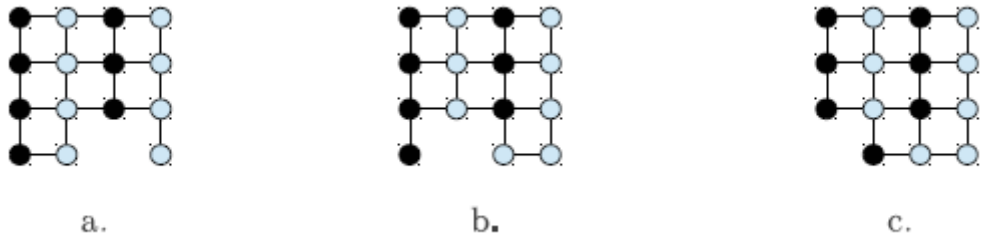
Daha öncede belirtildiği gibi, bu dönüşüm esnasında atomların birbirlerine olan komşulukları değişmezse ‘difüzyonsuz’ değişir ise ‘difüzyonlu’ faz dönüşümü olarak nitelenirler. Difüzyonsuz faz dönüşümünde atomlar arasındaki mesafe değişirken, atomlar arasındaki bağlar kopmaz. Difüzyonsuz faz dönüşümü Şekil 1.1’ de gösterilmektedir [15].



Şekil 1.1. Difüzyonsuz dönüşümün gösterimi. (a) yapının ilk durumu, (b) deformasyon sonucu kafes yapısındaki değişiklik, (c) deformasyonun artması sonucu yapıdaki değişim [15].

Difüzyonlu faz dönüşümünde ise atomlar arası bağlar koparak denge halinde tekrar oluşurlar. Atomlar arasında tekrar bağ oluşacağı için bu dönüşüm yavaş gerçekleşir.

Atomlar arasındaki komşuluklar değişebileceği için farklı atom dizilişleri ile karşılaşılabilir. Difüzyonlu faz dönüşümü ise Şekil 1.2' de verilmiştir [15].



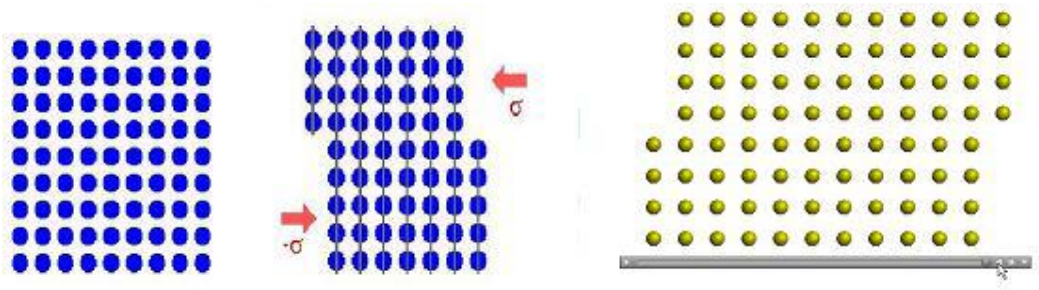
Şekil 1.2. Difüzyonlu dönüşüm. (a) difüzyonlu dönüşüm öncesi yapı, (b) atomlar arasındaki bağların koparak yeni bağların oluşması, (c) difüzyonlu dönüşüm sonrası yapı [15].

Atomların düz bir şekilde belli bir sırayla dizilmeleri kristal yapıya sahip malzemelerde birim hücreleri ve kafes yapılarını oluşturmaktadır. Faz dönüşümleri esnasında malzemenin atom dizilişlerinde farklılıklar meydana gelir. Atom dizilişlerinde dislokasyonların hareketiyle oluşmayan bu farklılıklar atom sıralarının belli bir düzleme olan mesafesinin belirli bir ölçek dâhilinde ilerlemesi sonucu oluşur. Bu değişiklikler 'ikizlenme' olarak tabir edilir. Östenit fazından martenzit fazına geçen şekil hafızalı alaşımlarda dönüşüm esnasında 'ikizlenmeler' meydana gelir. Buna ilaveten martenzit fazındaki bir malzemeye mekanik yük uygulanmasıyla yapı içinde oluşan ikizlenmeler yönlendirilebilirler [16].

Malzeme martenzit fazında iken küçük bir gerilme ile deformasyon gösterecek şekilde kolayca şekillenebilme özelliği göstermektedir. Fakat yüksek sıcaklık fazında yani östenit fazında iken kolaylıkla deforme edilemezler. Bunun nedeni östenit fazında malzemenin daha fazla akma dayanımına sahip olmasıdır. Malzeme östenit fazda iken dışarıdan ısıtma ve deformasyon yardımı ile geri kazanacağı herhangi bir şekil değişimi gerçekleşmez. Bunun nedeni yapıda faz değişiminin olmamasıdır [17].

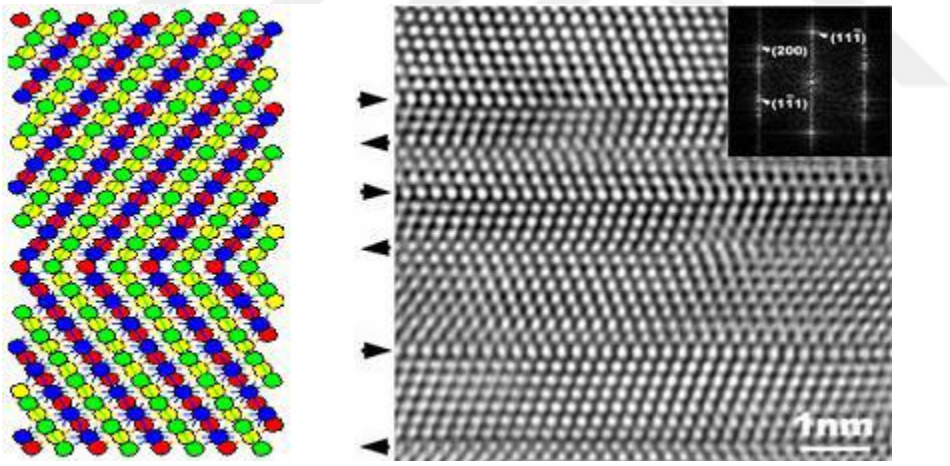
Martenzitik dönüşümlerde kayma ve ikizlenme türü deformasyon görülmektedir. Atomların bir düzlemde birbirlerine doğru kayma şeklinde oluşan deformasyonlar kayma türü deformasyonlar olarak adlandırılır. Şekil 1.3' te kayma türü deformasyon şematik olarak gösterilmiştir. Bu tür bozukluklar en fazla atomun olduğu düzlemde

gerçekleşir. Komşu atomlar zorlanır ve ileri itilirler. Malzeme kırılana kadar bu itilme devam eder [18].



Şekil 1.3. Kayma türü yapı bozukluğu [19].

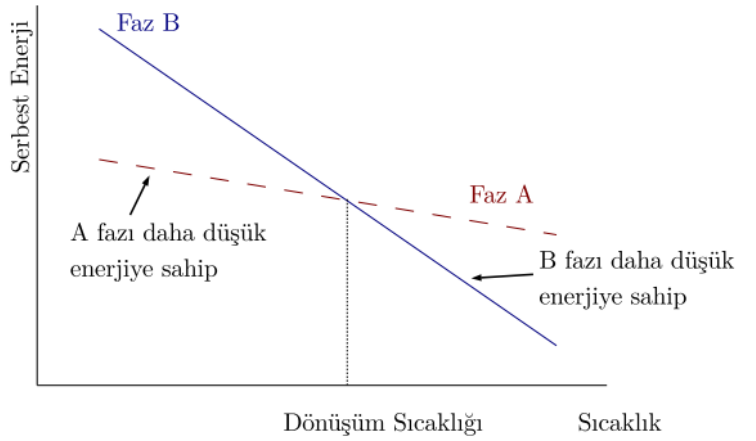
Martenzitik dönüşümlerde oluşan ikizlenme türü yapı bozukluğunda ise kristalin bir kısmının hacmi diğerine belirli bir açı kadar dönmüş olur (Şekil 1.4). Her iki hacim de aynı atomik düzenlerini sürdürürler ancak görünüş itibariyle aralarında açı bulunan iki düzlem şeklinde olurlar [18].



Şekil 1.4. İkizlenme türü yapı bozukluğu [19].

Faz dönüşümü, belli bir sıcaklık ve basınçta malzemede faz seçeneklerinin olması ile gerçekleşebilir. Malzemenin sahip olduğu faz seçeneklerinden hangisi en düşük enerjiye sahip ise sistem en düşük enerjili faz düzeninde durmaya yönelir. Yani alaşım tüm maddeler gibi enerjisini azaltmaya çalışmaktadır. Katı halde bulunan saf demiri çoklu faz seçeneği bulunan malzemeye örnek olarak verebiliriz. Şekil 1.5' te malzemede bulunan iki farklı fazın sıcaklığın artırılmasıyla serbest enerjilerindeki değişim gösterilmiştir. Sıcaklıkla beraber azalma eğimleri farklı olmak üzere faz enerjileri azalmış ve bir noktada kesişmiştir. Bu nokta faz dönüşümünün denge ve başlangıç

sıcaklığıdır. Bu noktadan sonra sıcaklık artmaya devam ettiğinde B fazı daha düşük enerji seviyesinde olduğu için tercih edilir. Çünkü sistem düşük enerjili fazda kalmak isteyecektir. Benzer şekilde eğer sıcaklık azaltılırsa tercih edilen faz A fazı olacaktır. Çünkü A fazı B' den daha düşük enerjiye sahip olduğu için tekrar kararlı hale gelecektir. Bu durum termodinamiğin denge koşulları gereğince geçerlidir. Bir faz düşük enerjili olmamasına rağmen sistemde varlığını sürdürüyorsa buna yarı kararlı durum adı verilir [15].



Şekil 1.5. Fazların serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi. Belli sıcaklıkta en düşük serbest enerjiye sahip faz, kararlı faz olmaktadır [15].

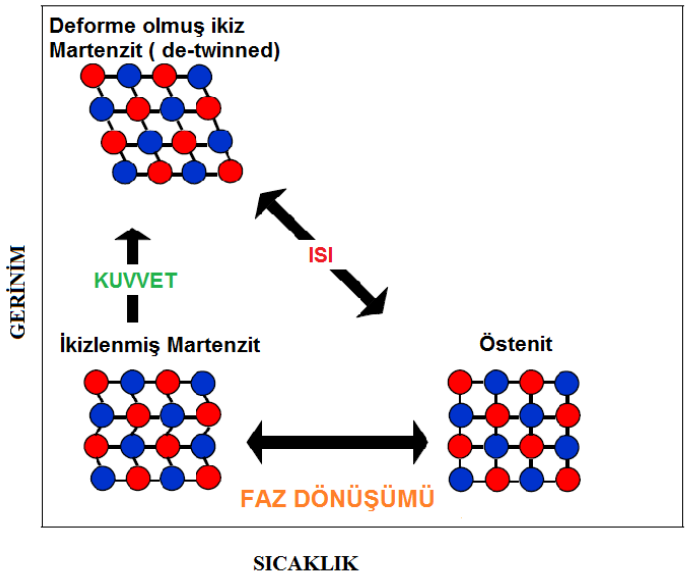
Katı faz dönüşümleri, malzeme içerisinde gerçekleşen kristal yapı dönüşümlerine dayanmaktadır. Bu faz dönüşümlerini, kristalografi ve termodinamik kanunları ile açıklamak mümkündür [20]. Şekil hafızalı malzemeler iki temel katı faz içermektedirler. Bu fazlardan östenit yüksek sıcaklık fazıdır ve sıcaklığın -alaşım sistemine göre değişen- belli bir değerin üzerinde olması halinde kararlı olur ($T>A_f$, östenit bitiş sıcaklığı), ayrıca ana faz olarakta bilinmektedir. Bir diğer katı faz ise düşük sıcaklık fazı olan martenzit fazıdır ve $T<M_f$ (martenzit bitiş sıcaklığı) olması halinde kararlı olur [20].

Yukarıda sayılan ana fazlara ek olarak, bazı alaşım sistemlerinde ara fazlara da (R-faz) rastlanır ve bu ara fazlar ancak bazı belirli kimyasal kompozisyon aralıkları ya da ısıl işlemler sonucu görülmektedir [21]. Ara fazın mantığı, katı fazın diğer faza dönüşmeden önce enerji açısından daha kolay bulduğu ara bir forma dönüşmesi ve daha sonra hedefi olan faza dönüşmesi olarak kısaca açıklanabilir.

Düşük sıcaklık fazı olan martenzit iki şekilde oluşabilir. Birincisi, faz dönüşümünde sürücü gücün kuvvet olduğu gerilme-kaynaklı (stress-induced) martenzit fazıdır. Bu dönüşümde gerilme, oluşan farklı yönelimlerdeki martenzit varyantlarını önüne katar ve tek varyant oluşturmaya çalışır. Buda malzemede makro ölçekte şekil değişimine neden olur.

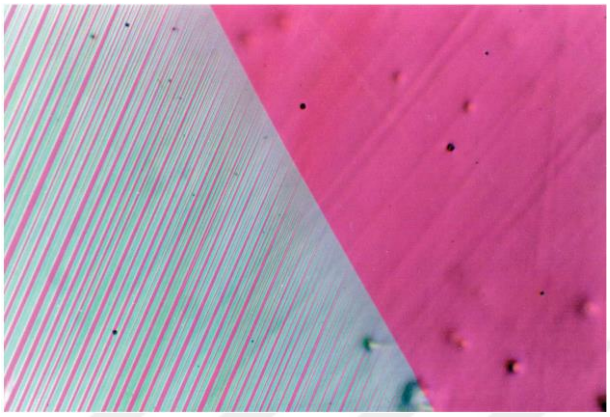
İkincisi ise dışarıdan herhangi bir kuvvet uygulanmadan, sadece sıcaklık ile gerçekleşen faz dönüşümü sonucu oluşan martenzit fazıdır. Bu tür faz dönüşümleri sonucunda, malzeme içerisinde kafes yapıları östenit diziliminden martenzit dizilimine dönüşür. Malzeme içerisinde oluşan ikizlenmiş martenzitler farklı yönelimlerde olabilir ve bundan dolayı malzemede makro boyutta bir şekil değişimi gözlenmez. Östenit ve martenzit arasında gerçekleşen bu faz dönüşümlerinin kaynağı sıcaklık, gerilme ya da manyetik kuvvet olabilir ve geri kazanılabildiği için literatürde termo-elastik martenzitik faz dönüşümleri olarak bilinmektedir [22].

Şekil 1.6' da şekil hafızalı alaşımların temel özellikleri şematik olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi, faz dönüşümleri sıcaklık kaynaklı ve gerilme kaynaklı olabilmektedir. Düşük sıcaklıktaki ikizlenmiş martenzit (twinned martensite) fazının sıcaklığı artılırılınca, malzeme şekil değişimi (strain) geçirmeksizin yüksek sıcaklık fazı östenit (austenite)' e dönüşür. Orijinal martenzit fazının eldesi ise sıcaklığın tekrar düşürülmesi ile sağlanabilir.



Şekil 1.6. Şekil hafızalı alaşımlarda temel özelliklerin şematik ile gösterimi [23]

Şekil 1.7’ de martenzit ve östenit fazları Cu-bazlı şekil hafızalı alaşımlarda aynı anda görülmektedir. Soldaki iğnemsi yapılar martenzit fazı iken sağ taraftaki düz kısım östenit fazıdır. Martenzit fazı büyümekte ve östenit fazının yerini almaktadır.

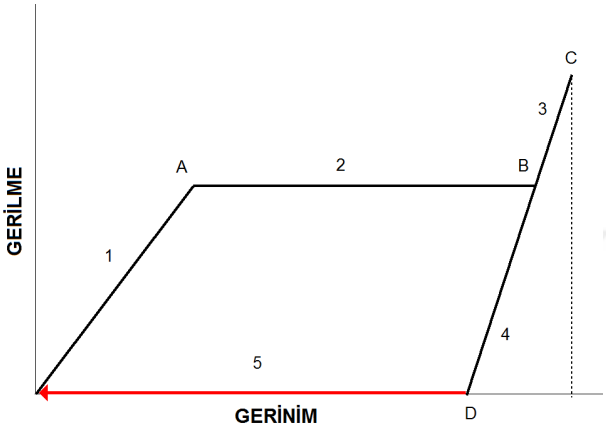


Şekil 1.7. Martenzit ve östenit fazlarının mikroyapıda aynı anda görünümü [24]

Martenzit fazı ikizlenme ile oluşmaktadır. Bu faz düşük sıcaklıkta kuvvet uygulanarak deforme edilirse, deformasyon ve ikizlenmenin beraber görüldüğü martenzit (de-twinned martensite) fazına dönüşür. Bu dönüşüm sırasında dış kuvvet uygulandığı için malzemede şekil değişimi de gözlenir. Bu durumda malzeme üzerindeki kuvvet kaldırılsa dahi sıcaklık kritik sıcaklığın altında olduğu için ($T<A_f$) tekrar orijinal haline geri dönemez. Bu dönüşüm için ekstra enerji gerekir ve bu ekstra enerji sisteme ısı olarak verilir. Isıtılan malzemenin sıcaklığı A_f dönüşüm sıcaklığı üzerine çıktığı zaman, deforme olmuş martenzit, östenit fazına dönüşür ve sıcaklık deformasyondan önceki başlangıç sıcaklığına getirilirse yani malzeme soğutulursa, orijinal fazı olan ikizlenmiş martenzit fazına geri döner. Bu işlem sonunda, malzeme üzerinde meydana gelen deformasyon geri kazanılmış ve malzeme orijinal boyutlarına ulaşmış olur. Böylece malzeme içerisinde sıcaklık ve kuvvet etkileri ile termo-elastik martenzitik faz dönüşümü gerçekleşmiş olur.

Karakteristik bir şekil hafıza etkisi eğrisi Şekil 1.8’ de görülmektedir. Şekil hafıza etkisinin gözlemlenebilmesi için malzemenin martenzit fazında olması gerekir. Şekildeki 1 bölgesinde martenzit fazında olan malzeme elastik deformasyon geçirir ve A noktasında bu elastik deformasyon teorik olarak biter. A noktası, ikizlenmiş martenzit fazının deformasyonunun başladığı noktadır ve bu deformasyon 2 bölgesi olarak görülen plato boyunca devam eder. İdeal durumlarda bu eğri düz bir plato şeklindedir,

ancak pratikte fazların birbirlerinin hareketlerini engellemeleri neticesinde pekleşme görülebilir. Bu bölgede süperelastik etkideki gibi (bölge 3) bir faz dönüşümü olmamakta, sadece ikizlenmiş halde bulunan atomların kuvvet etkisi ile dizilimleri değişmektedir. Bu dizilim değişikliğine bağlı olarak malzemede şekil değişimi gözlemlenir.



Şekil 1.8. Şekil hafızalı alaşımların şekil hafıza etkisi eğrisi [25]

Eğrinin 2. bölgesinin bitişi ile B noktasında ikizlenmiş martenzit varyantlarının yönelimleri teorik olarak tamamlanmış olur. Kuvvet uygulanmaya devam ederse, malzemede plastik deformasyon görülebilir. Eğer uygulanan yük kaldırılır ise grafiğin 4 numaralı eğriyi takip etmesi beklenir ve bu bölge malzeme de oluşan elastik deformasyonun geri kazanıldığı bölgedir. 4 numaralı eğri D noktasında sonlanır ve görüldüğü gibi eğri başlangıç noktasına ulaşmamıştır. Buda malzemede şekil değişimi görüldüğünü ve yükün kaldırılması ile geri tamamen kazanılamadığını gösterir. Oluşan şekil değişiminin tamamen geri kazanılabilmesi için malzemeye dışarıdan enerji verilmesi gerekir ve bu enerji ısı enerjisidir. Eğer malzeme bu durumda iken ısıtılır ve sıcaklığı A_f sıcaklığı üzerine çıkarılır ise bölge 1' de de görüldüğü gibi deforme olmuş martenzit fazı önce östenit fazına dönüşecek ve şekil değişimi geri kazanılacaktır. Bu geri kazanım grafikte 5 numaralı bölge ile gösterilmiştir. Bu bölgede eğri ısı etkisi ile tekrar başladığı noktaya geri döner ve malzeme orijinal haline dönmüş ve oluşan şekil değişimi geri kazanılmış olur. Böylece termo-elastik faz dönüşümü yardımı ile malzemede oluşan şekil değişimi geri kazanılmış olmaktadır.

Şekil 1.9' da gösterilen toparlanma (geri kazanım) sırasında malzemenin boyutlarının sınırlandırılması yani boyut değişimine izin verilmemesi halinde ise malzeme

içyapısında gerilme oluşur. Bu özellik gerilme üretimi olarak bilinmektedir ve oluşan gerilme yük kaldırma vb. olmak üzere birçok yerde kullanılabilir. Bu gerilmenin nedeni, düzen değiştirmeye çalışan atom grubunun engellenmesidir. Bu engelleme malzemenin içyapısında çarpılma meydana getirir ve iç gerilmeye neden olur. Gerilme üretim özelliği özellikte şekil hafızalı alaşımların pratik uygulamalarda kullanılabilecek yararlı bir özelliğidir [1].

Şekil hafızalı alaşımların fiziksel ve mekanik özellikleri, kimyasal kompozisyonu ya da farklı ısıl işlemlerin uygulanması [2,26-27] ile değiştirebilir ve bu değişimlerin farklı nedenleri vardır. Bu nedenlerden sadece birkaçı çökelti oluşması, tane büyüklüğü değişimi, matrisin kimyasal kompozisyonun değişmesi vb. olarak sayılabilir [2].

Farklı şekil hafızalı alaşım sistemleri (AuCd, MnCu, MnPt, CuSn, NiAl, AgCd, CuZn, FePd, FeMnSi vb.) içerisinde, NiTi alaşımları etkileyici fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı üzerinde oldukça yoğun çalışılan ve diğer alaşım sistemlerinin (NiTiHf, NiTiPd, NiTiCu, NiTiHfPd, NiTiHfCu vb.) üretiminde temel olarak kullanılan alaşım sistemidir [27-31]. Bundan dolayı, pratik uygulamalarda en çok kullanılan ve kullanılma potansiyeli olan alaşım sistemleri de NiTi ve NiTi bazlı alaşım sistemleridir. Aşağıdaki tabloda ticari ürüne dönüşmüş NiTi alaşımlarının bazı özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.1. Ticari NiTi alaşımlarının bazı özellikleri [32]

Özellik	***Sembol***	***Birim***	***Martenzit***	***Östenit***
Korozyon Dayanımı	-	-	*300 serisi paslanmaz çelik ya da Ti alaşımlarına benzer*	-
Yoğunluk	ρ_D	kg/m^3	*6450-6500*	
Elektrik direnci	ρ_R	$\mu\Omega cm$	*76-80*	*82-100*
Özgül Isı Kapasitesi	c	J/kgK	*836,8*	*836,8*
Isıl İletkenlik	k	W/mK	*8,6-10*	*18*
Isıl Genleşme Katsayısı	α	m/mK^{-1}	*6,6 x10^{-6}*	*11,0 x10^{-6}*
Maksimum Çekme Dayanımı	σ_{UTS}	MPa	*895 (tavlanmış)* *1900 (ısıl işlem ile sertleştirilmiş)*	-
Young Modülü	E	GPa	*28-41*	*75-83*
Akma Dayanımı	σ_Y	MPa	*70-140*	*195-690*
Poisson Oranı	ν	-	*0,33*	-
Manyetik Hassasiyet	χ	$\mu emug^{-1}$	*2,5*	*3,8*

1.2. Kronolojik Sırayla Önceki Çalışmalar

Şekil hafızalı alaşımlar üzerindeki çalışmalar 1980' lerden önce başlamış olup Amerika ve Japonya'da kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bugüne kadar şekil hafızalı alaşımların kullanılabilir olduğu yaklaşık dünya çapında alınan 30000 patent ile belgelenmiştir [5].

Pek çok alaşım içerisinde NiTi ve Cu bazlı alaşımlar en çok kullanılan ve araştırılan alaşımlardır. Bakır bazlı alaşımların maliyetinin ucuz olmasından ötürü daha kolay ticarileşeceği öngörülmektedir [33, 34].

Fakat, NiTi alaşımları bakır bazlı alaşımlara kıyasla daha fazla şekil hatırlama ve süperealastiklik özellikleri dolayısıyla en fazla ilgiyi uyandırmış, literatür yoklamasına bakıldığında endüstri ve birçok üretim alanında oldukça fazla çalışmanın yapıldığı görülmektedir [35]. Bunların bazıları gerilmeli yaşlandırmalar sonrasında yapılmıştır [26,36].

Şekil hafıza olayının temeli sayılan martenzitik faz dönüşümü, ilk defa Adolf Martens tarafından 1890 yılında gözlenmiş olup katıhâl fiziğinde ve metalürji alanında geniş yer tutmuştur. 1900' lü yılların başlarında üzerinde en çok çalışılan metalurji konusu olmuştur. İlk olarak tersinir bir dönüşüm sağlayan Fe-C sisteminde görülmüştür [9].

1963' lerde Amerika'daki United States Naval Ordance Laboratuar'ında eşatomlu NiTi alaşımının şekil hafıza etkisini keşfettiler ve bu alaşım Nitinol (Nikel Titanyum Naval Ordance Labaratuar) ismi ile tescillendirildi. Alaşımın özelliklerinin keşfi tesadüf üzere gerçekleşti. Numunelere darbe testleri çekiç ile vurularak yapılıyordu. Araştırmacılar, bir süre darbe testi uyguladıktan sonra numuneleri pencere kenarına koyup öğle yemeğine çıktılar. Döndüklerinde ise darbe uyguladıkları numunelerin kendi kendilerine tekrar düzeldiklerini gördüler [11, 37, 38].

1965 yılına gelindiğinde NiTi alaşımına bir üçüncü Fe ya da Co gibi elementlerin eklenmesi ile oluşan yeni alaşımın dönüşüm sıcaklığında çok önemli düşüş olduğu keşfedildi [9]. 1970' li yıllarda ilk kez kullanılan NiTi malzemeden yapılmış ilk implant yani yapay diş kökü, 1968' lerde Johnson ve Alicandri tarafından üretildi [37].

1980 yılından sonra ortopedik ve ortodontik uygulamalarda kullanılan şekil hafızalı alaşımların 1990 yılının ortalarında stent olarak da kullanımına başlanması ticari olarak en geniş uygulamasını medikal endüstrisinde başlatmıştır [9,37].

Şekil hafızalı alaşımların çoğunluk olarak dönüşüm aralığının çok düşük sıcaklıklarda olması, üretim aşamasındaki maliyetlerin fazla oluşu ve düşük hafıza kapasitesine sahip olmaları tercih edilebilirliklerini azaltmaktadır. Ancak farklı elementler katılarak özelliklerinin iyileşmesi için çalışmalara devam edilmektedir.

Bakır bazlı şekil hafızalı alaşımlar hakkında Türkiye'de pek çok çalışma yapılmıştır. İlk olarak ülkemizde başlangıcı Erol SELİMBEYOĞLU ve Sabri ALTINTAŞ' ın 1986 yılında CuAlNi alaşımlarında yaptıkları çalışma ile olmuştur [39].

1996 yılında Shield vd. şekil hafızalı tellerde sabit yük altında sanki-statik uzama üzerine çalışma yapmışlardır [40].

Basma-çekme şeklindeki çevrimsel deformasyon altında NiTi şekil hafızalı alaşımların mekanik davranışına yönelik Birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalara ilişkin TEM gözlemlerine dayanarak çevrimsel sertleşme ve yumuşama olgularına ilişkin açıklamalar yapılmıştır. Her adımdan sonra martenzitik NiTi alaşımının mikro yapısı incelenmiş, makroskopik deformasyon davranışı hakkında bilgi alınmıştır [41].

Ayrıca bu çalışmalarda, alaşımlardaki ikizlenmiş alanların tekrardan düzenlenmesi yönündeki çalışmada martenzit ikizlerin deformasyon sürecini, gerilim genliğinin fonksiyonu olarak tanımlandırmışlardır [41].

1999 yılında Miyazaki ve Ishida püskürtme ile çökertilmiş NiTi bazlı şekil hafızalı alaşımların gelişimi hakkında incelemede bulunmuştur [42].

Yine aynı yıllarda yapılan bazı çalışmalarda, tek ve çift yönlü şekil hafızaya sahip NiTi alaşım üzerinde çalışılmış, ısı akısı DSC (differantial scanning calorimeter) yani diferansiyel taramalı kalorimetre ile ölçmüştür. Bulunan tek ve çift yönlü şekil hafızalı alaşımlara ait dönüşüm sıcaklıkları ve entalpileri bulunmuş, veriler birbirleri ile kıyaslanmış, sonuçları tartışılmıştır ve buna bağlı matematiksel bir ifade de çıkarılmıştır [41].

1999 yılında NiTi şekil hafızalı alaşımlarda mikro yapının çift yönlü şekil hafıza kararlılığı üzerine etkisini Scherngell ve Kneissl çalışmışlar ve bu kararlılığa çökeltilerin ve dislokasyonların etki edebileceği tahmininde bulunmuşlardır [43].

NiTi şekil hafızalı alaşımlı teller üzerine 2000 yıllarında araştırmacılar çalışmış, bu çalışmayı ısıl-mekanik yüklemeler esnasında alaşımda oluşan elektrik direnci değişimleri üzerine yapmışlardır. Varılan sonuçlara bakılarak NiTi alaşımlı telin gerilme sensörü olarak kullanımının zor olduğu ancak gerinim sensörü olarak kullanılabileceği saptanmıştır. Genelde malzeme plastik şekil değişimine uğraması malzemenin elektriksel özelliğini etkilemektedir [41].

2000 yılında tek yönlü şekil hafıza etkisi Erbstoeszer vd. tarafından araştırılmış, çevrim sayısı artsa dahi malzemenin şekil hafıza etkisini devam ettirmesi arzulanmıştır [44].

2001 yılında araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda, NiTi alaşımına bakır ekleyip eğme testlerine tabi tuttuklarında oluşan üçlü alaşımın NiTi alaşımına nazaran daha üstün mekanik özellik sağladığı, daha dar histerezise sahip olduğu fakat hücre zehirlenmesi durumunun NiTi alaşımına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin ortama salınan bakır iyonlarından kaynaklandığı tespit edilmiştir [41].

2002 yılında gözenekli NiTi şekil hafızalı alaşımının vücutta kemik yerine görev yapabilmesi ve kemik dokusunun NiTi alaşımı içerisinde ilerlemesi Seung-Baik Kong ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. 50 adet Yenizellanda tavşanı kullanılan bu deneyde, tavşanların vücutlarına kemik yerine kullanılacak olan NiTi implantlar yerleştirilmiş ve bir süreliğine gözlemlenmiştir. Vücuda yerleştirilen implantlar herhangi bir olumsuz sonuç vermemiştir. Altı hafta kadar sonra ise kemik dokusunun kullanılan implant gözeneklerinin büyük bir kısmını doldurduğu tespit edilmiştir. NiTi şekil hafızalı alaşımların vücutla mükemmel uyum içerisinde olduğu bu çalışma ile gözler önüne serilmiştir [45].

2002 yılında bilim adamları tarafından NiTi şekil hafızalı alaşımın sabit gerilme altında gerçekleşen ısıl çevrimde R fazının kararlılığı incelenmiştir. Oda şartlarında martenzitik faz durumunda olan alaşımlarla martenzitik fazda östenitinde bulunduğu R fazı üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Numunelere gerilme uygulandığında her ikisinde de çevrimin ısıtma kısmında R fazından östenit fazına dönüşümünü başlattığı ancak

gerilme uygulanmadığı durumda ise çevrimin yalnız soğutma kısmında R fazına rastlanmıştır. Bunun neticesinde gerilmenin artması durumunda R fazının daha baskın görüldüğü sonucuna varılmıştır [41].

2003 yılında Matsumoto NiTi bazlı şekil hafızalı malzemelerin ısıl çevrim sırasındaki davranışlarını incelemiş, yapılan değerlendirmeler sonucu belli sıcaklıklarda değişimin olduğu saptanmıştır [46].

Benzer şekilde NiTi şekil hafızalı alaşımlarda ısıl çevrim sırasındaki alaşımın dönüşüm davranışları DSC ile yapılan analizler yardımı ile tespit edilmiştir [41].

2004 yılında araştırmacılar NiTi alaşımlarında yaşlandırma işleminin etkisini araştırmışlardır. Uyguladıkları yaşlandırma tekniğinin ardından gerçekleşen dönüşüm incelenmiş, R faza dönüşümün matriksteki homojensizliklerin neden olduğu saptanmıştır [41].

2004 yılında Meng vd. tarafından NiTiHf şekil hafızalı alaşımında çift yönlü şekil hafıza etkisi eğme testleri yapılarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen gerinim NiTi şekil hafızalı alaşımlar arasında NiTiHf şekil hafıza geriniminin en yüksek şekil hafıza gerinimi olduğu tespit edilmiştir [47].

2005 yılında araştırmacılar NiTi alaşımının yapay kas olarak kullanarak bir robot ortaya çıkarmışlar, bu sayede robotik alanında da şekil hafızalı alaşımların kullanılabileceğine dikkat çekmişlerdir. Bu çalışmada eşatomlu NiTi teller, robotun hareketiyle ilgili yapay kas görevini gerçekleştirmesi için kullanılmıştır. Sonuç olarak, motorlar vasıtasıyla hareket alan robotlara göre çok daha sessiz bunun akabinde ise hareket kabiliyeti daha düşük olan bir robot olduğu kanısına varmışlardır. Robotun performansının en iyi olduğu durumlar tespit edilmiştir [45].

2005 yılında yapılan bazı çalışmlalarda, iki yönlü şekil hafızalı alaşımlar üzerine çalışmışlardır. Şekil hafıza etkisinin şekil hafızalı alaşımların doğal yapısından yani özünden gelen bir davranış olup olmadığını araştırmışlardır. İki yönlü şekil hafıza olayının doğal olarak gerçekleşmediği, uygun ısıl-mekaniki işlemler neticesinde eğitilerek gerçekleşeceği sonucuna varmışlardır. Doğal olan davranışın çok düşük bir

etkiye sahip olduğu, zamanla çevrimler artırıldığında ortadan kalktığını gözlemlemişlerdir [41].

2007 yılında araştırmacılar ağırlıkça belli oranlarda birleştirilen NiTi alaşımının aşınma davranışını araştırmışlardır. Yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerin diğerlerine oranla daha az aşındığını tespit etmişlerdir. Bu sayede NiTi şekil hafızalı alaşımlara yaşlandırma işlemi uygulanmasının mekaniki özelliklerini artırdığı sonucunu çıkarmışlardır [45].

2007 yılında yapılan bazı çalışmalarda, belli oranlarda birleştirilen NiTi alaşımının aşınma davranışını incelemişlerdir. Numunelerin bir kısmına tavlama ısıl işlemini uygulamışlar ve yapılan aşınma testleri neticesinde tavlama ısıl işlemi uygulanan numunelerin daha az aşındığı, mekaniki özelliklerin daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır [45].

2008 yılında Nurveren vd. farklı sıcaklık ve sürelerde tavlanan NiTi alaşımlarını DSC cihazı ile farklı hızlarda ısıtma ve soğutma yapmışlar ve değişen parametreleri detaylı olarak incelemişlerdir. Farklı hızlarda ısıtma ve soğutma süreçlerinden geçirilen numunenin dönüşüm sıcaklığının, dönüşüm eğiliminin ve içyapısının değiştiği sonucuna varmışlardır [41].

2009 yılında Ti, Ni ve iki farklı NiTi alaşımlarının aşınma davranışları bazı araştırmacılar tarafından çalışılmıştır. Yapılan deneyler ve testler neticesinde NiTi alaşımlarının aşınma oranları arasında ciddi farkın oluşmadığı fakat NiTi alaşımlarının Ti ve Ni' ye göre çok daha az aşındığı sonucuna varılmıştır [45].

2010 yılında Bor ve Aydoğmuş NiTi alaşım üretimi ve karakterizasyonu üzerinde çalışmışlar, çalışmada 21 μm(mikrometre) boyutlarında toz metalürjisi yoluyla üretilmiş Titanyum ve Nikel tozları kullanılmıştır. Vücutta kemik yerine görev yapabilirliği konusunda deneyler yapmışlar ancak gözeneklerin çok küçük olmasından vücutla uyumsuz olduğunu saptamışlardır. Diğer yandan üretilen malzemenin filtreleme işlemlerinde kullanılabilirliğini saptamışlardır [45].

2010 yılından sonra ise şekil hafızalı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar hız kesmeden devam etmiştir. Bu yıllardan sonra alaşımların yüksek sıcaklık uygulamaları

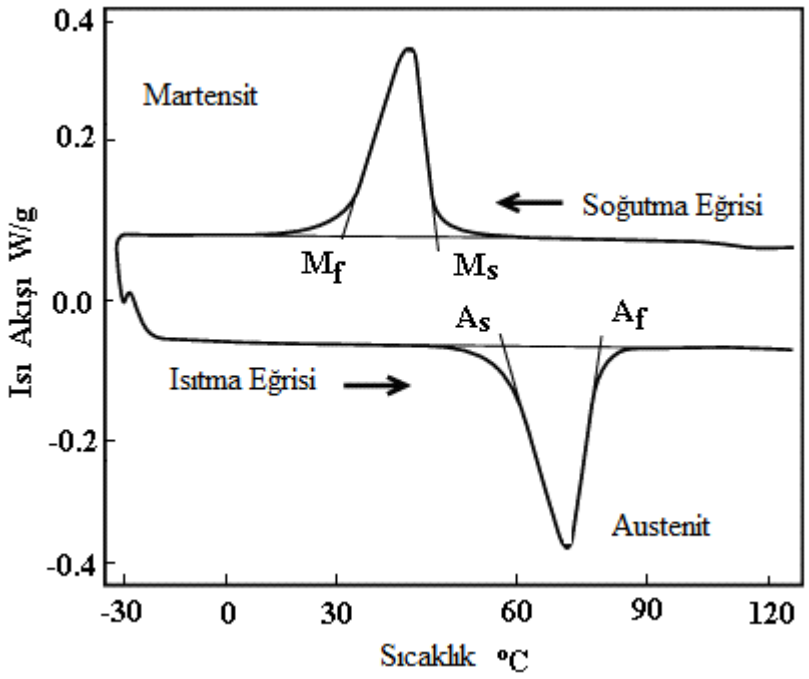
için kullanılabilirliği yoğun olarak incelenmiş ve havacılık uygulamaları için alternatif olabilecek yüksek sıcaklıkta çalışabilen şekil hafızalı alaşımlar üzerinde çalışılmıştır [31, 32].

BÖLÜM 2

ŞEKİL HAFIZA OLAYI ve KULLANILDIĞI ALANLAR

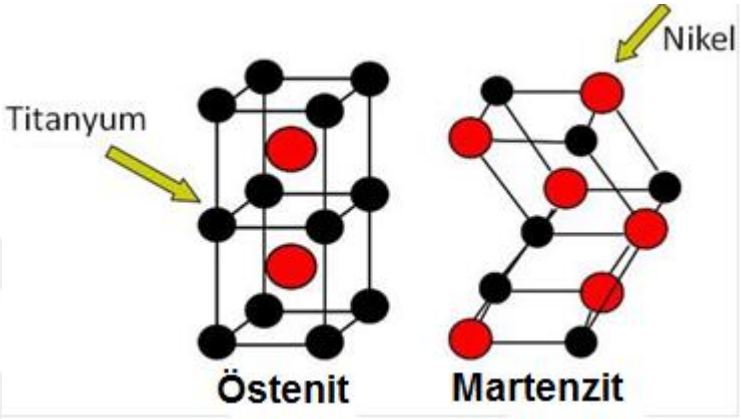
2.1. Şekil Hafızalı Alaşımların Mikroyapıları ve Şekil Hafıza Olayı

Şekil hafıza etkisi ve süperelastiklik özelliği barındıran şekil hafızalı alaşımlarda martenzitik dönüşüm ve tersine dönüşüm gerçekleşir. Şekil hafıza olayı, malzeme östenit başlama sıcaklığı altındayken plastik deformasyona uğradıktan sonra östenit bitiş sıcaklığına ısıtıldığında malzemenin ters dönüşüm etkisi göstererek yeniden eski şekliyle elde edildiği olaydır. Faz dönüşümü esnasındaki martenzit ve östenit dönüşümün başlayış ve bitiş sıcaklıkları önem teşkil etmektedir. Bu sıcaklıkları belirlemede termal analiz yöntemi çok kullanılır. Şekil 2.1‘ de NiTi alaşımına ait termal analiz sonucu gösterilmiştir [48].



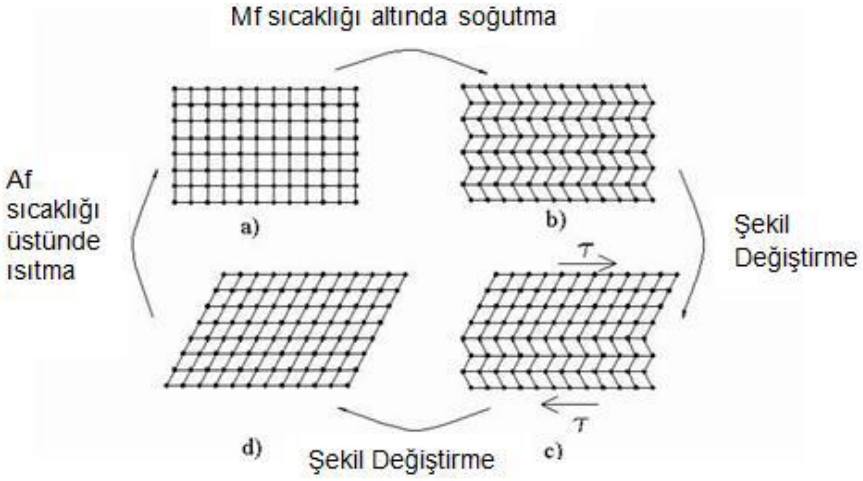
Şekil 2.1. NiTi alaşımına ait termal analiz (DSC) sonucu [48].

Şekil hafıza olayını iyi şekilde kavrayabilmek için kristal yapısını anlamak gerekir. Şekil 2.2' de iki farklı fazın kristal yapısı gösterilmiştir. Genel tabirle düşük sıcaklık fazı martenzit fazı, yüksek sıcaklık fazı ise östenit fazı olarak bilinir. Bu fazlar malzemenin uğradığı deformasyondaki gerilmenin miktarı ve sıcaklığıyla alakalıdır.



Şekil 2.2. Martenzit ve Östenit yapıların birim hücre görünümü [49]

Şekil 2.3' te gösterildiği gibi östenit fazındaki alaşım soğutulursa dış şeklinde herhangi bir değişiklik görülmezken içyapısı martenzit fazına geçer. Bu sıcaklıkta malzeme plastik şekil değişimine uğratılır. Malzeme ısıtıldığında ise östenit fazına yeniden dönüşmektedir [10].

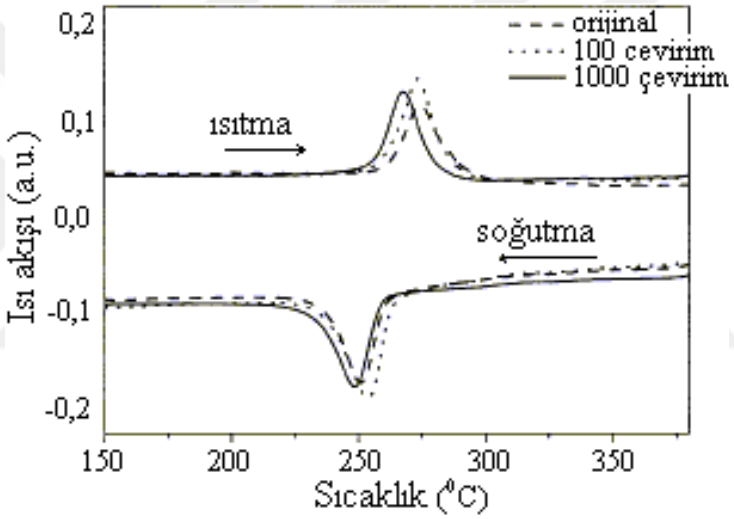


a) Östenit Fazı b) Martenzit Fazına Dönüşüm c) Şekil Değişimi d) Östenit Fazına Dönüşüm

Şekil 2.3. Şekil hafıza olayında dönüşümün mikro yapı mekanizması [10]

Anlaşılacağı üzere ısıtma sırasında belirgin bir tepe vardır. Bu tepe tetragonal martenzitten kübik östenite dönüşümle alakalıdır. As sıcaklığında (262,5 °C) östenit dönüşüm başlayarak Af sıcaklığında (287,8 °C) tamamlanmıştır. Soğutma sırasında östenit martenzite dönüşmüştür. Bu durum tepe ile eğri üzerinde gösterilmiştir. Martenzit fazına dönüşüm martenzit başlama sıcaklığı olan Ms (260,2 °C) ile başlar ve Mf (237,8 °C) ile tamamlanır [49].

Alaşımın ısıtılması ve soğutulmasıyla dönüşüm sıcaklıklarının saptanabilmesi için diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) tekniği kullanılır. NiMnGa şekil hafızalı alaşımına ait farklı çevrimlerden sonraki DSC eğrileri Şekil 2.4' te verilmiştir [49-50].



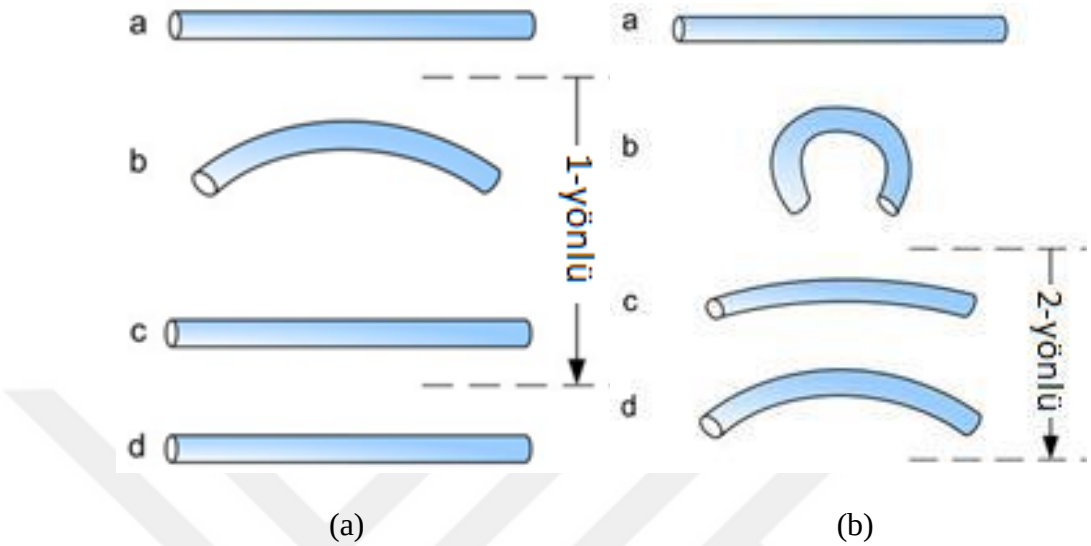
Şekil 2.4. Farklı termal çevrimlerden sonra $Ni_{24}Mn_{25}Ga_{21}$ alaşımının DSC eğrileri [49]

2.1.1. Şekil Hafızalı Alaşım Türleri

Bir şekil hafızalı alaşım soğutma sürecinden geçirildikten sonra yapısı martenzite dönüşüyor fakat herhangi bir şekil değişimine uğramıyorsa buna tek yönlü şekil hafıza olayı denir. Alaşım martenzit fazında deforme edildiğinde şekil bozukluğunu ısıtılana kadar korur. Ancak ısıtılmış olan malzeme, martenzit faza tekrar döndüğünde deforme edilmiş şeklini geri kazanamaz. Bu sadece tekrar deformasyona uğraması ile mümkün olur [51-52].

Şekil hafızalı alaşımlarda çift yönlü şekil hafıza olayı şu şekilde gerçekleşir. Malzeme martenzit fazda deforme edildiğinde tek yönlü şekil hafıza olayındaki gibi şekil değiştirir. Malzeme ısıtıldığında östenit faza geçerek orijinal şeklini alır. Tekrar

soğutulduğunda ise malzeme martenzit fazına geçer ve tekrar deforme olmuş halini alır. Buna çift yönlü şekil hafıza olayı adı verilir [49].



Şekil 2.5. (a) Tek yönlü şekil hafızalı alaşım, (b) İki yönlü şekil hafızalı alaşım [49]

2.2. Süperelastiklik Özelliği

Şekil hafızalı alaşımlarda süperelastiklik özelliği faz dönüşümü neticesinde gerçekleşir. Alaşıma östenit sınır bölgesinin üstünde bir sıcaklıkta gerilme uygulandığında Şekil 2.6' daki eğri oluşur.

A-B arası elastik deformasyona aittir.

B' de martenzit oluşmaya başlar.

B-C arası martenzit faz oranı artarak devam eder.

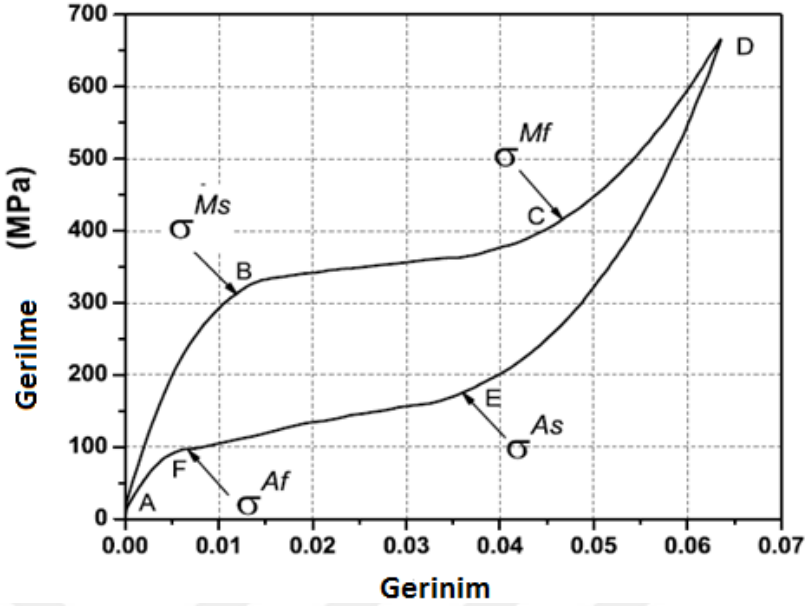
C' de martenzitik dönüşüm biter ve sonrasında alaşım tamamen martenzit fazındadır.

C' den sonra uygulanan gerilme biraz daha artırılarak D noktasında bırakılır.

D-E arasında alaşıma uygulanan elastik deformasyon geri verilmeye başlanır.

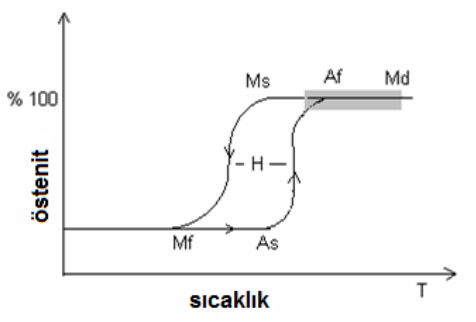
E-F arasında martenzitten östenite dönüşüm başlar ve östenit oranı giderek yükselir.

F-A arasında alaşım östenit fazındadır ve şeklin geri dönüşümü tamamlanmış olur.



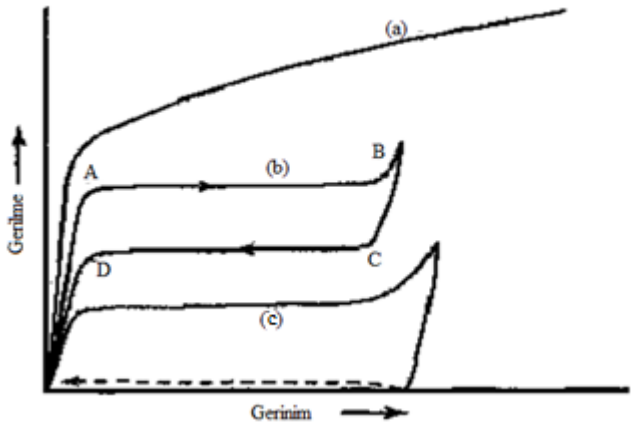
Şekil 2.6. Tipik bir şekil hafızalı alaşımda gerilme-gerinim diyagramı [9]

Şekil hafızalı alaşımlarda süperelastik özelliği için ön şart olarak alaşım sıcaklığının östenit fazın üzerinde olması gerekir. Bunun için genelde alaşım oda sıcaklığında östenit fazın üzerinde olduğu durumlar tercih edilir. Süperelastiklik özelliği kullanarak geliştirilen NiTi diş teli alaşımı örnek verilecek olursa alaşımın sıcaklığı -5 ile 10 °C arasında bulunmaktadır. Bunun neticesinde alaşım ağız içinde östenit sıcaklığının üstünde bulunarak süperelastik davranış gösterir. Şekil 2.7' de şekil hafızalı alaşımlarda östenit dönüşüm oranı-sıcaklık grafiği görülmektedir [53]. Bu özellik özellikle aktüatör uygulamaları için önemlidir.



Şekil 2.7. Şekil hafızalı alaşımlarda östenit dönüşüm oranı-sıcaklık grafiği [53]

Şekil hafızalı alaşımların mekanik özellikleri, belirli sıcaklıklardaki yapısal dönüşümlerine bağlı olarak farklılık gösterir. Bu durum, aşağıda verilen nikel-titanyum alaşımının gerilme-gerinim eğrilerinden anlaşılabilir [8].

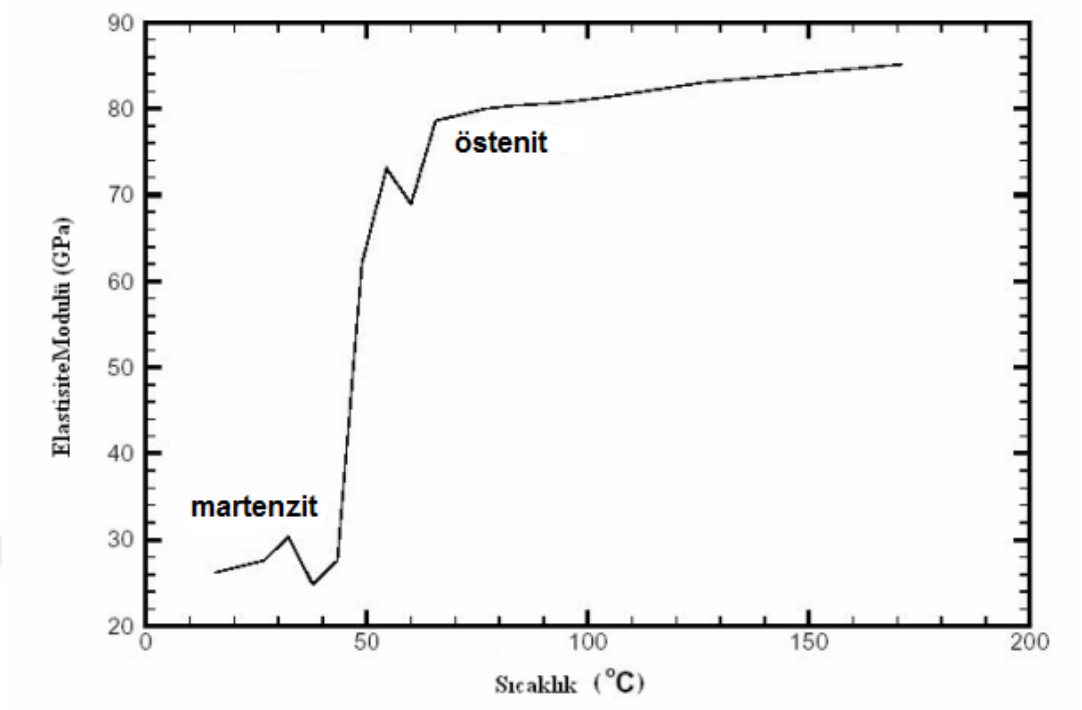


Şekil 2.8. Farklı sıcaklıklarda dönüşüme ilişkin gerilme-gerinim eğrileri. (a) geleneksel davranış, (b) süperelastik davranış, (c) şekil hafızalı davranış [8]

NiTi alaşımlı malzemeye farklı sıcaklıklarda çekme testleri uygulanmıştır. Görüldüğü üzere martenzit yapılar, çok düşük gerilmelerde bile kolay bir şekilde deforme olabilmektedir. Ancak yüksek akma dayanımına sahip östenit yapılar kolaylıkla deforme edilememektedir. Martenzit eğrisinde, gerilme ortadan kalktıktan sonraki ısıtma durumu kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Malzeme östenit fazına dönüştüğü zaman malzemede şekil değişimi olmaksızın önceki şeklini hatırlayıp ilk şeklinin korur. Malzeme östenit fazda bulunduğu esnada ısıtma ve gerinmeye maruz kalması durumunda orijinal şekil yeniden kazanılmaz. Çünkü herhangi bir faz değişimi söz konusu değildir [8].

Yukarıdaki şekilde AB hattında sabit bir gerilmeye maruz bırakılan malzemede gerinim artmakta, malzeme şekil değişimine uğramaktadır. CD hattında ise daha düşük bir gerilme altında östenit faza dönüşür. Malzemenin şekil kazanımı ısı uygulanmasından değil, gerilmenin azalmasındandır. Bu etki süperelastiklik olarak adlandırılır ve malzemenin aşırı elastik olmasından kaynaklanır. Süperelastiklik doğrusal değildir. Young (Elastiklik) Modülü, gerilmenin birim şekil değiştirmeye oranıdır. Alaşımın Elastiklik Modülünün belirlenmesi söz konusu sıcaklıkta gerilme ve gerinime bağlı olduğu için çok zordur [8].

NiTi alaşımının martenzit ve östenit sıcaklıklarındaki elastiklik modülü Şekil 2.9’ da verilmiştir.

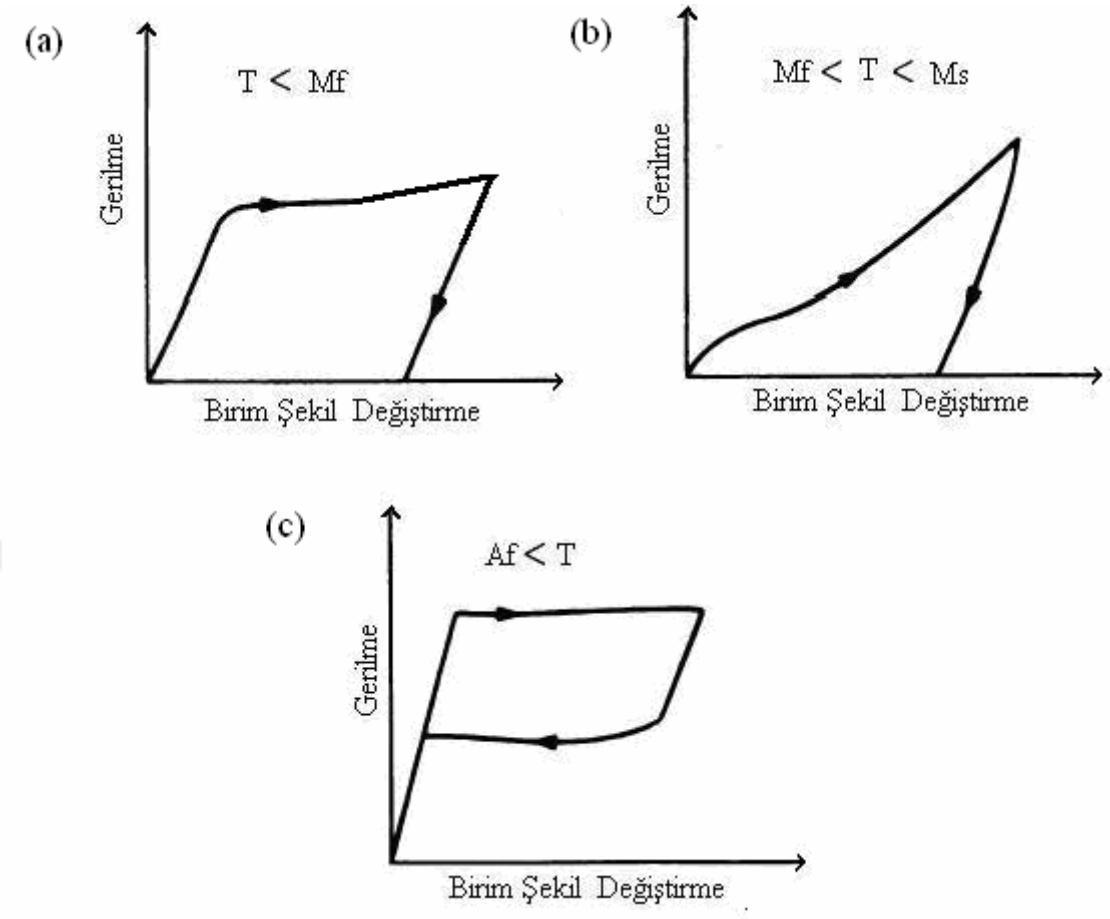


Şekil 2.9. Alaşımın elastiklik modülü - sıcaklık diyagramı [54]

NiTi şekil hafızalı alaşımların gerilme-şekil değiştirme grafikleri M_f sıcaklığı altından başlanarak M_f - M_s arası ve A_f sıcaklığı üstünde ayrı ayrı ele alınmıştır [53].

Şekil 2.10 a' daki grafikte, martenzit fazında bulunan NiTi alaşımı uygulanan gerilme ile birlikte akma sınırının üstünde akmaya maruz kaldığında plastik şekil değişimi göstermiştir. Şekil 2.10 b' deki grafikte, bu sıcaklıkta alaşım tam olarak martenzite henüz dönüşmemiştir. Yapısında östenit bulunduğundan uygulanan gerilme ile birlikte martenzit fazına dönüşüme devam edildiğinde plastik şekil değişimi gözlenmektedir [53].

Şekil 2.10 c' deki grafikte, NiTi alaşımı tamamıyla östenit yapıda olduğu için süperelastiklik özellik göstererek uygulanan gerilmeyle elastik deformasyona maruz kalır. Akma sınırı altında tamamıyla martenzitik yapı oluşup gerilme ortadan kalktığında malzeme geri dönüşüm gösteren davranış sergileyerek elastik şekil değişimi öncesi yapısına döner [53].



Şekil 2.10. NiTi alaşımlarının gerilme – birim şekil değiştirme diyagramları [53]

NiTi alaşımların tek ve çift yönlü şekil hafıza özelliklerinin oluşu, korozyon direncinin ve yorulma ömrünün bakır bazlı alaşımlara göre daha iyi olması kullanım alanını genişletmiştir. Ayrıca elektrik direncinin bakır bazlı alaşımlara göre 8 kat daha iyi olması üstünden akım geçirildiklerinde istenilen şekil değişimi için gerekli sıcaklığa hızla ulaşmalarına imkân sağlamıştır [54].

Geri dönüşümlü uzama oranı olarak 300 serisi paslanmaz çeliklere kıyasla 10 kat daha iyi olan şekil hatırlamalı ve süperelastiklik özellikleri ile NiTi alaşımları, birçok alanda kullanılan 300 serisi paslanmaz çeliklerin de yerini almaya başlamıştır. 300 serisi paslanmaz çeliklerin en fazla olarak kullanıldığı alan olan ortodontik diş telleri de artık yerini şekil hafızalı alaşımlar kullanılarak geliştirilen diş tellerine bırakmıştır [53].

2.3. NiTi-X Alaşımları (X Alaşım Elementi)

Kısa bir tanımı yapılırsa Ti sembolü ile gösterilen Titanyum, 22 atom numarasına sahip elementtir. Güçlü, hafif, korozyona karşı dirençli, parlak, grimsi bir geçiş metalidir. Alüminyum, demir, molibden, vanadyum elementleriyle alaşım yapabilir [55].

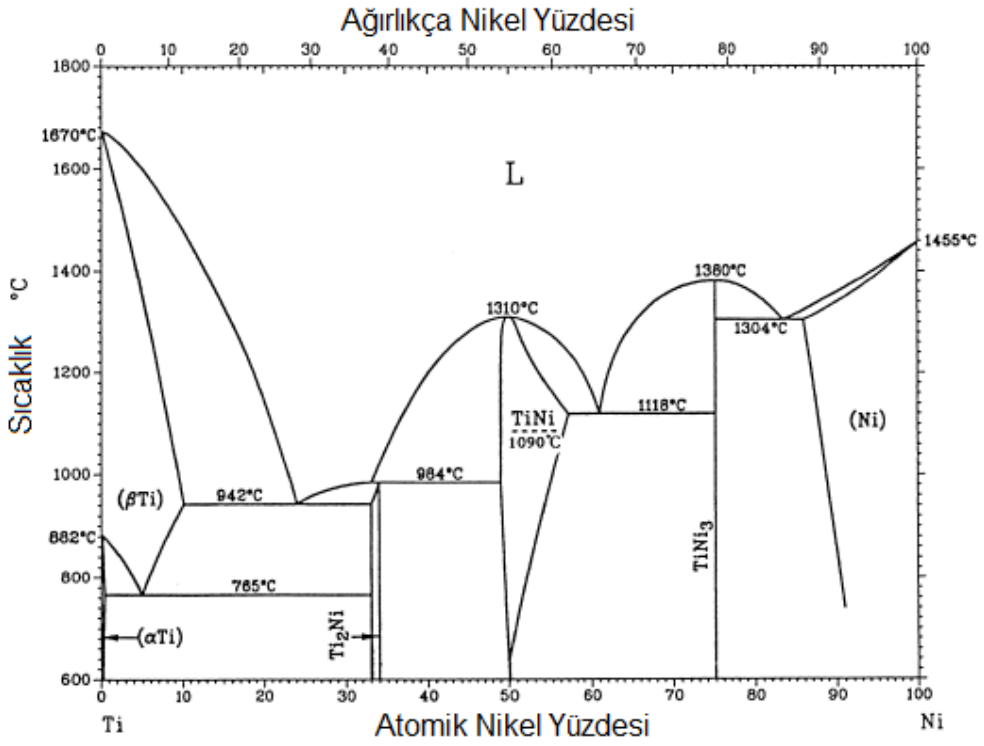
Alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra yeryüzünde en fazla rezervi olan dördüncü elementtir. Reaktif bir metal olan titanyumun elde edilmesi zordur. Saf titanyum, ancak belirli süreçlerden geçirilerek elde edilebilir [56].

Metaller içinde en fazla güç/ağırlık oranına sahip olan titanyum, saf hali ile de tamamen esnektir. 1649 °C' den yüksek erime noktasına sahip oluşuyla tercih edilesi dayanıklı metallerdendir. Titanyumun en belirgin özelliği ise korozyona karşı aşırı mukavemetli oluşudur [55].

Kısa bir tanımı yapılırsa Ni sembolü ile gösterilen Nikel, 28 atom numarasına sahip elementtir. Periyodik tabloda geçiş metalleri arasında yer alan nikel, gümüş-beyaz renkli oldukça sert yapılıdır. Genel olarak kobalt, kükürt, demir ve arsenik ile birlikte bulunur. Paslanmaz çelik, bozuk para, mıknatıs ve özel alaşımlar gibi pek çok üründe nikel yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakır, alüminyum, krom, kurşun, altın ve gümüş ile yaptığı alaşımların ise birçok kullanım alanı vardır [55].

NiTi alaşımları şekil hafıza etkisi ve süper-elastik etki gibi özgün özellikleri, ana faz olan B2 kübik fazından B19 monoklinik fazına gerçekleşen termo-elastik martenzitik dönüşümü ile gerçekleştirir. Çoğunlukla bu faz dönüşümü ana fazdan trigonal kristal yapısına sahip bir ara faza (R-phase) gerçekleşir ve daha sonra martenzit fazına dönüşüm sağlanır. Bu dönüşüm ana faz olan östenit fazının başlangıç özelliklerine oldukça yakından bağlıdır. Bundan dolayı alaşımın kimyasal kompozisyonu (örneğin Ni oranı), yaşlandırma, alaşım elementi ilavesi, termal-mekanik işlemler vb. işlemler, östenitin yapısını etkilediğinden dolayı, şekil hafıza özelliklerinin kontrolü de direk olarak bu işlemlerden etkilenir.

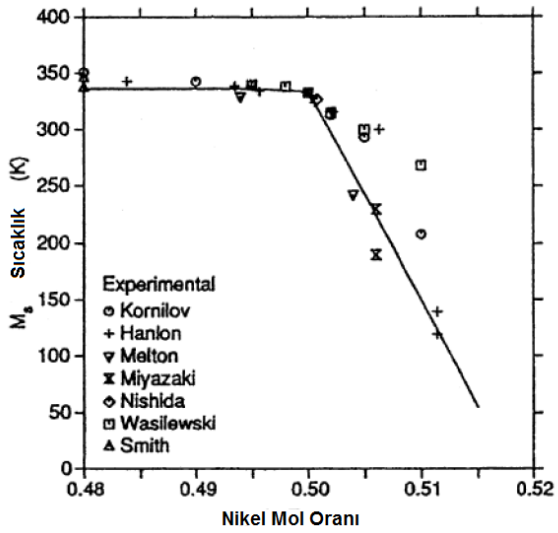
NiTi alaşımı üzerinde günümüze kadar birçok araştırma yapıldığından, alaşım sisteminin özellikleri genel hatları ile iyi bilinmektedir. Şekil 2.11' de NiTi alaşım sisteminin faz diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.11. NiTi alaşım sistemi faz diyagramı [2]

Faz denge diyagramından da anlaşılabileceği gibi 600 ^{o}C altındaki bölge oldukça dar olduğu için gösterilmemektedir. Diyagramda farklı kimyasal kompozisyonlar için oluşan fazlar görülmektedir. Oluşan fazların kimyasal kompozisyonlara göre çok hassas olarak değiştiği faz diyagramından anlaşılmaktadır.

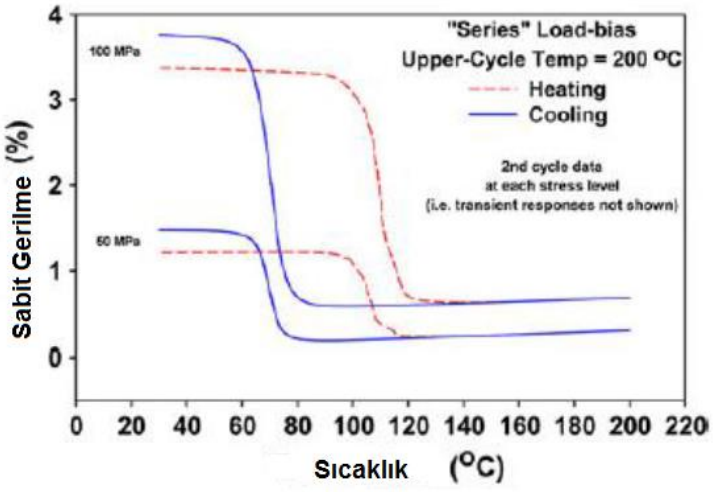
Şekil hafızalı alaşımların özellikleri birçok faktöre bağlı olduğu gibi kimyasal kompozisyona da yakından bağlıdır. Şekil 2.12' de NiTi alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının, alaşımdaki Ni oranına göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.12. NiTi alaşım sisteminde dönüşüm sıcaklıklarının Ni oranına göre değişimi [57]

Şekilden de anlaşıldığı gibi dönüşüm sıcaklıkları yaklaşık % 50 Ni oranına kadar çok hassas görünmemektedir. Daha sonra ise Ni artışı ile düştüğü görülmektedir.

Şekil 2.13' te ise NiTi alaşımlarının sabit gerilme altında ısıtma-soğutma deneyi ile elde edilen şekil hafıza özelliği görülmektedir. Grafikten anlaşılabileceği gibi dönüşüm sıcaklıkları 100 ^{o}C altındadır ve bu özellik, NiTi alaşım sisteminin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımının uygun olmadığını göstermektedir.

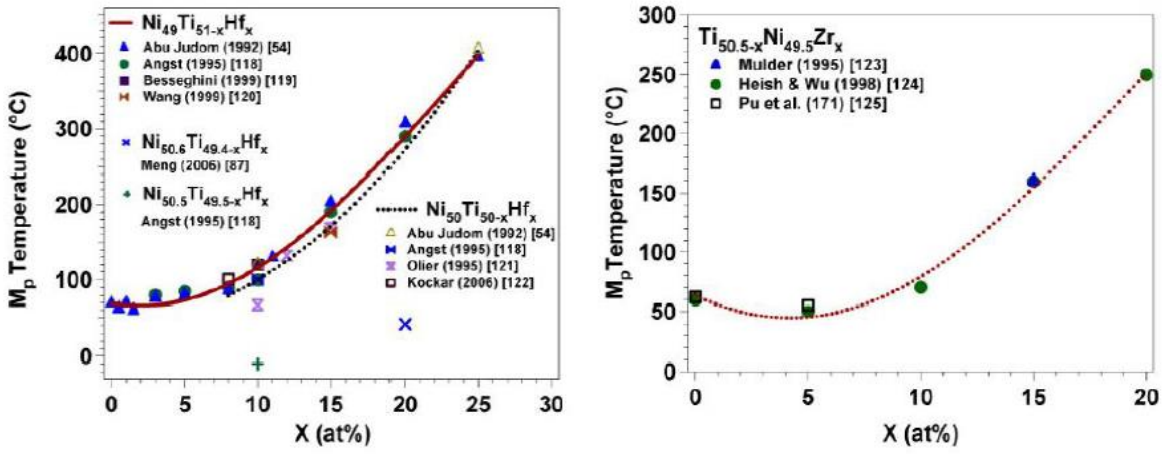


Şekil 2.13. NiTi alaşımının sabit yük altında şekil hafıza etkisi [58]

NiTi şekil hafızalı alaşımların özelliklerini daha iyi hale getirebilmek için az miktarda olması koşuluyla alaşımın içine üçüncü bir element daha katılabilir. Bu elementlerin ilavesi alaşımın özelliklerinde farklılığa neden olur [59].

Yüksek sıcaklıkta çalışamama bu alaşım sistemleri için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Çünkü bazı uygulamalar (havacılık, yağ-benzin vb.) dönüşüm sıcaklıklarının en az 100 ^{o}C' nin üzerinde olmasını gerektirmektedir. Bundan dolayı NiTi alaşımlarının dönüşüm sıcaklılarını yükseltmek için çeşitli yöntemlere başvurulmuştur. Bu yöntemlerin en etkilisi alaşımlama olarak söylenebilir. Farklı alaşım elementleri ile NiTi sistemi alaşımlanmış ve dönüşüm sıcaklıkları ölçülmüştür. Kullanılan alaşım elementlerinden V, Al, Co, Cu, Mn gibi elementlerin dönüşüm sıcaklıklarını düşürdüğü, Hf, Zr, Pd, Pt gibi elementlerin ise dönüşüm sıcaklılarını artırdığı görülmüştür [60].

Dönüşüm sıcaklıklarını artıran elementlerden en etkili olanları ise Hf ve Zr olarak belirlenmiştir. Şekil 2.14' te Hf ve Zr elementlerinin dönüşüm sıcaklıkları üzerindeki etkisi görülmektedir.

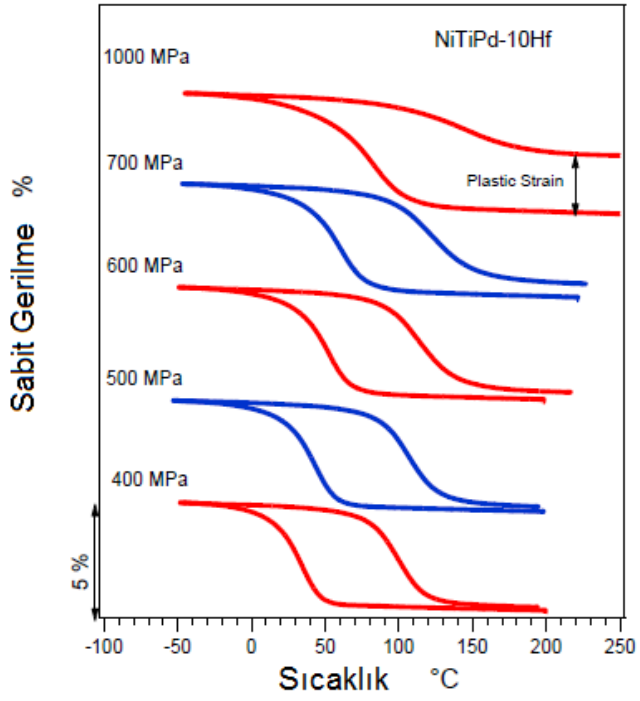


Şekil 2.14. Hf ve Zr elementlerinin dönüşüm sıcaklıkları üzerindeki etkisi [60]

NiTiHf ve NiTiZr alaşımları içinde, en çok ilgi gören alaşım sistemi NiTiHf alaşımlarıdır. Bunda özelliklerinin daha kararlı olması önemli bir etkendir. Ancak bu alaşım sisteminin de bazı dezavantajları bulunmaktadır. Ti bakımından zengin olan kompozisyonların mekanik özellikleri iyi değilken, Ni bakımından zengin olana alaşımlar ise kırılgandır ve bu özellikler pratik uygulamalar açısından problem oluşturmaktadır. Bu nedenle yapılan bazı çalışmalarda alaşım sistemine dördüncü bir

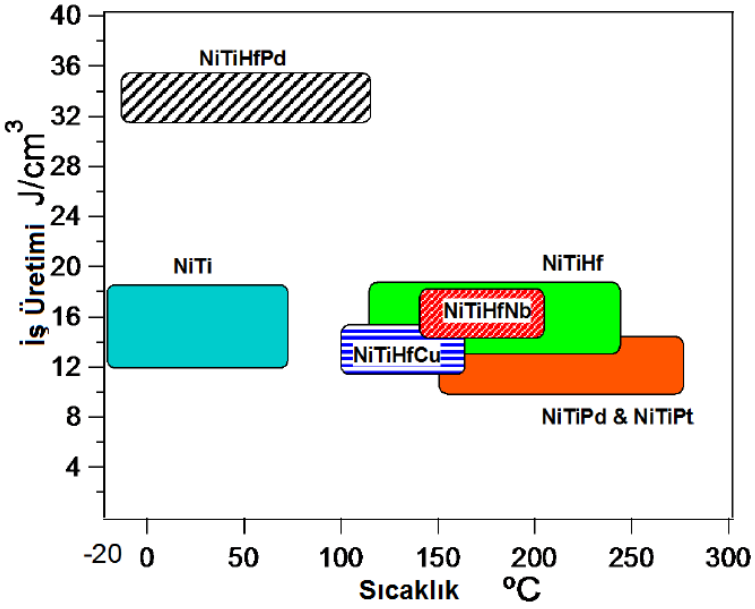
element katma yoluna gidilmiş ve bu şekilde alaşımın özellikleri iyileştirilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan dörtlü alaşım sistemlerinden en başarılı olanı ise NiTiHfPd alaşımlarıdır.

Yapılan çalışmalarda NiTiHfPd alaşımlarının, 1000 MPa gibi oldukça yüksek basma gerilmeleri altında tersinir şekil değişimi gösterebildiği görülmüştür. Bu gerilme değeri şekil hafızalı alaşımlar için oldukça yüksek bir gerilmedir. Bu özellik Şekil 2.15' te görülmektedir.



Şekil 2.15. NiTiHfPd alaşımlarının sabit yük altında şekil hafıza etkisi [23]

Bu özelliğe bağlı olarak (yüksek gerilmeler altında tersinir şekil değişimi) NiTiHfPd alaşım sistemlerinin iş üretme kabiliyetleri de diğer alaşımlara kıyasla oldukça iyidir. Şekil 2.16' da iş üretme kapasiteleri diğer şekil hafızalı alaşımlar ile kıyaslanmıştır.



Şekil 2.16. NiTi-bazlı farklı alaşım sistemlerinin iş üretme kapasiteleri [31]

İş üretme kapasiteleri aktüatör uygulamaları için önemli bir özelliktir. Aktüatörün ne kadarlık bir yükü hareket ettirebileceğini göstermektedir. Ayrıca yüksek dayanıma sahip şekil hafızalı alaşımlar kullanım açısından pek çok avantajlara sahiptir. Bu alaşımların dayanımı yüksek olduğundan, diğer alaşımlara kıyasla aynı işi daha küçük boyutlardaki parçalar ile yapmak mümkün olmaktadır. Buda malzeme kullanımını azaltarak ağırlığı azaltmakta ve ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Aynı zamanda yapılan parçaların daha taşınabilir ve az yer kaplaması bu sayede mümkün olabilmektedir.

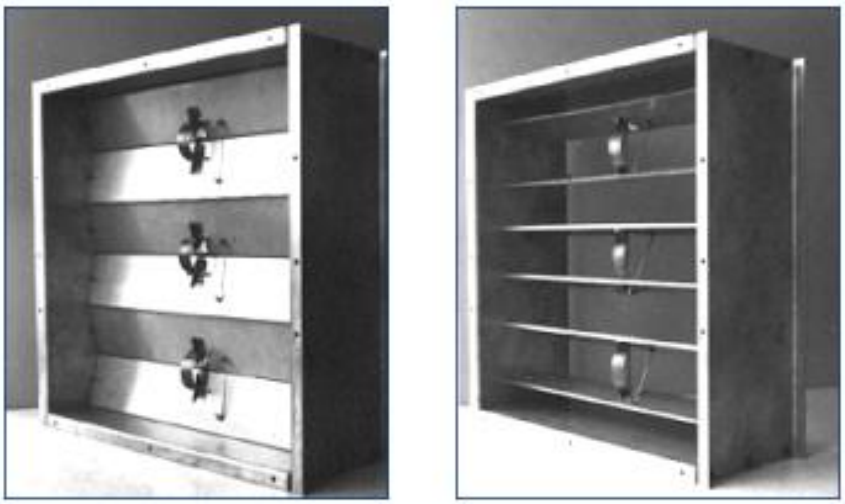
2.4. Şekil Hafızalı Alaşımların Kullanıldığı Alanlar

2.4.1. Endüstriyel Uygulama Alanları

Şekil hafızalı alaşımlar içerisinde NiTi ve Cu esaslı alaşımlar endüstri sektöründe en çok kullanılan şekil hafıza özelliğine sahip alaşımlardır. Bulundurdukları özellikleri birbirinden farklı olan bu alaşımlar önemli ticari değere sahiptir. Cu esaslı alaşımda şekil hafıza gerinimi % 4-5 aralığında iken, NiTi esaslı alaşımlarda bu değer yaklaşık % 8’ dir. NiTi bazlı alaşımlar Cu esaslı alaşımlara göre korozyon dirençleri oldukça iyi ve süreklilikleri daha yüksektir. Cu esaslı alaşımlar ise daha geniş dönüşüm sıcaklığına sahip, eritilmeleri daha kolay ve aynı zamanda daha ekonomiktirler. Özet olarak bu iki

alaşımında özelliklerine ve mevcut şartlara göre kullanılabildikleri alanlar mevcuttur [4].

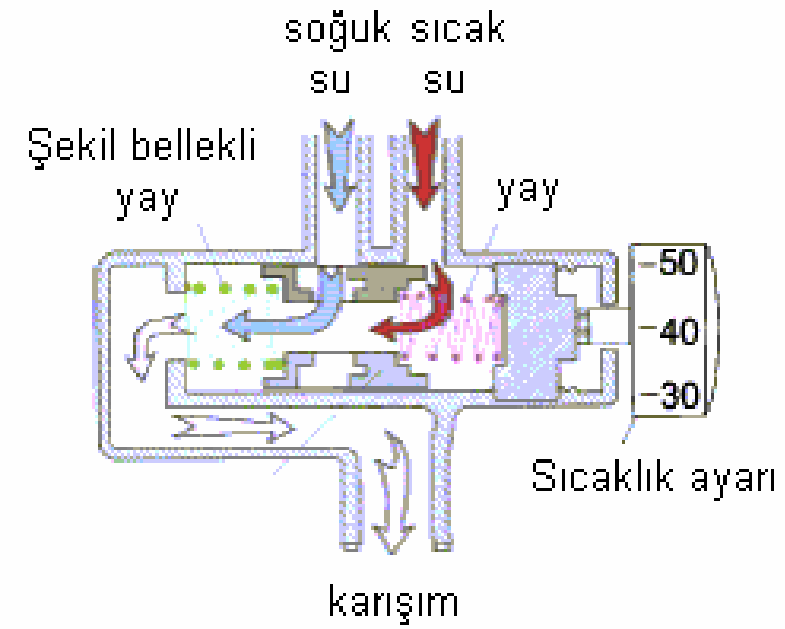
NiTi şekil hafızalı alaşımlar ortamın sıcaklığını baz alarak otomatik bir şekilde açılıp kapanan sera pencereleri ve fan kapakları sisteminde kullanılır. Şekil 2.17' te bulunduğu sıcaklığa göre açılıp kapanan sera pencere sistemi verilmiştir [53].



Şekil 2.17. Bulunduğu ortamın sıcaklığına göre kapanıp açılan sera pencere sistemi [53]

NiTi şekil hafızalı alaşımların yay olarak kullanıldığı endüstriyel uygulamalardan biri de Şekil 2.18' de gösterilen çıkış sıcaklığı ayarlanabilir akışkan sıvı valfidir [61].

Sistem içinde bulunan yaylar sıcak ve soğuk su girişlerini kayan bir parça aracılığıyla açıp kapayarak istenilen sıcaklık seviyesinde sıvı çıkışını sağlamaktadır. Sistemde su sıcaklığı arttığında şekil hafızalı alaşımdan yapılan yay, termoelastik faz dönüşümü ile östenit sıcaklığına doğru yükselirken uzamaktadır. Bu uzama hareket eden parçayı ileri doğru iterek sıcak su girişini azaltır. Aynı şekilde sistemde su sıcaklığı azaldığında ise yay kısalır ve diğer yayın baskısı ile hareketli parça soğuk su girişini azaltır. İstenilen sıcaklıkta sıvı çıkışının sağlanabilmesi için uygun yay oranları seçilir [53].

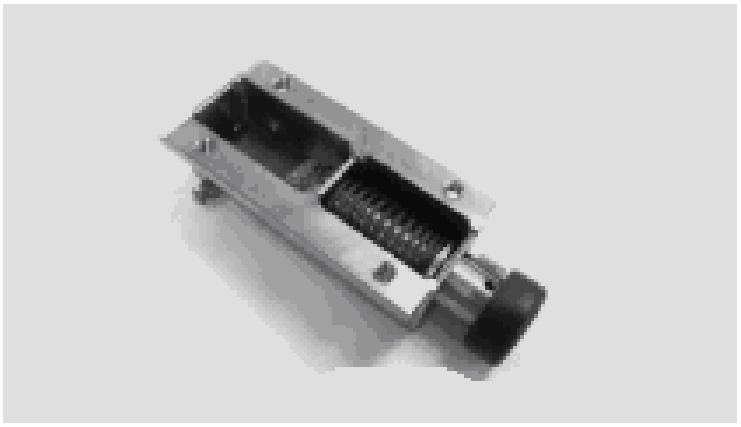


Şekil 2.18. Çıkış sıcaklığı ayarlanabilir akışkan sıvı valfi [53]

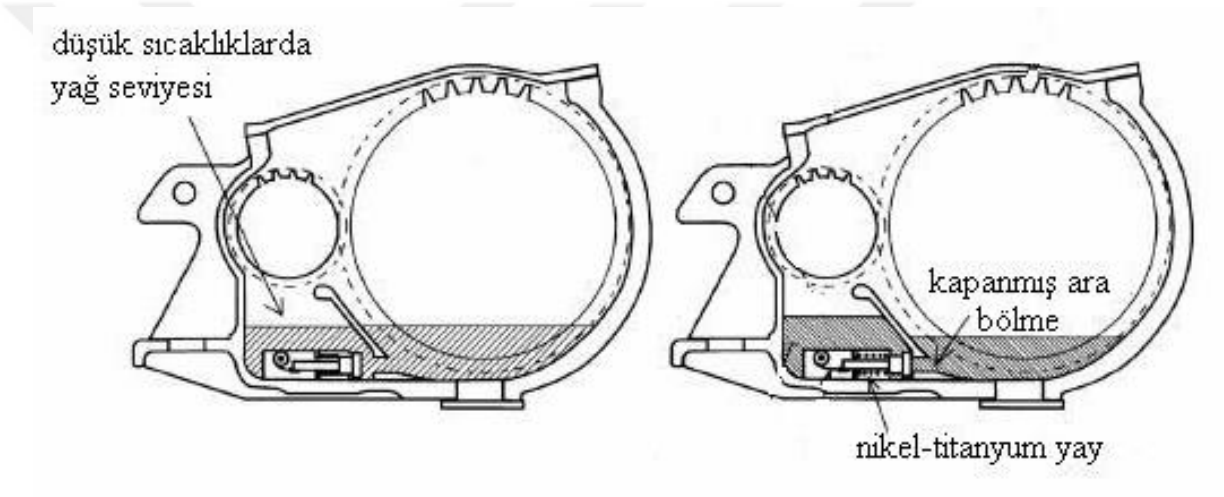
Şekil hafızalı alaşımların aktüatör olarak kullanılmasına Japon Shikansen hızlı trenlerinde otomatik yağ seviye ayarlayıcısı olarak kullanılmaları örnek verilebilir. Burada tren yüksek hızlara ulaştığında dişli kutusunda ortam sıcaklığı artacağı için şekil hafızalı alaşımdan yapılan yay değişime uğrayarak valfi tetikler. Yayın tetiklemesi ile de iki odaya ayrılan dişli kutusunun arasındaki valf açılır. Amaç, bu valfin açılıp kapanmasını yağın sıcaklığı ile kontrol etmektir [61].



Şekil 2.19. Shinkansen Nozomi-700 hızlı treninin fotoğrafı [61]



Şekil 2.20. Otomatik yağ seviyesi ayarlama parçası [61]

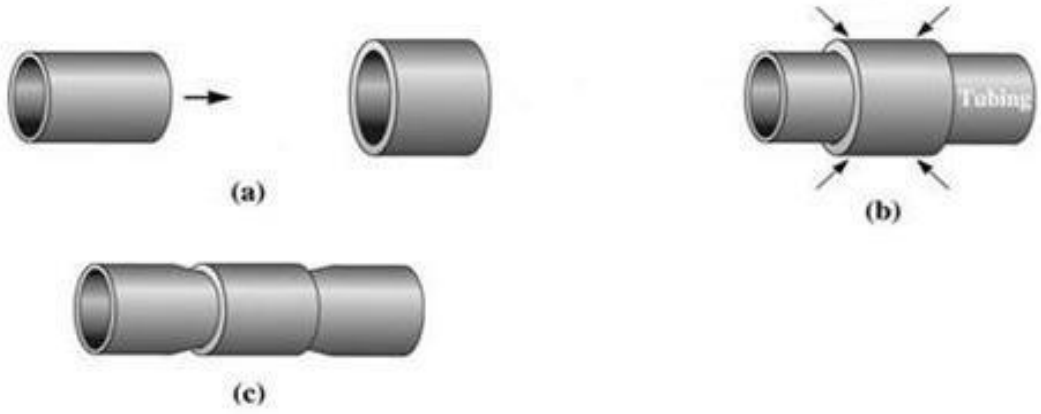


Şekil 2.21. Otomatik yağ seviyesi ayarlama parçasının kullanıldığı dişli kutusu [61]

Şekil hafıza özelliğinden faydalanılarak yapılan zorlamalı enerji bazlı ürün tipinin en başarılı uygulaması Raychem Şirketi'nin yaptığı Cryofit hidrolik kaplinlerdir. Bu kaplinler birleşecekleri metak tüpten çok az küçük silindirik bilezik şeklinde tasarlanmışlardır. Martenzitik fazda iken malzemenin çapı genişletilir ve montajlanır. Daha sonra ısıtılarak östenit fazına getirilen malzemenin çapı daralarak eski boyutuna dönmeye çalışır. Bu sayede metal tüpe sıkı şekilde montelenir. Metal tüp kaplinin eski şeklini almasını engeller ve bu sayede yaratılan gerilme ile kaynak işlemine eşdeğer güçlü bir birleşme gerçekleştirilir [62].

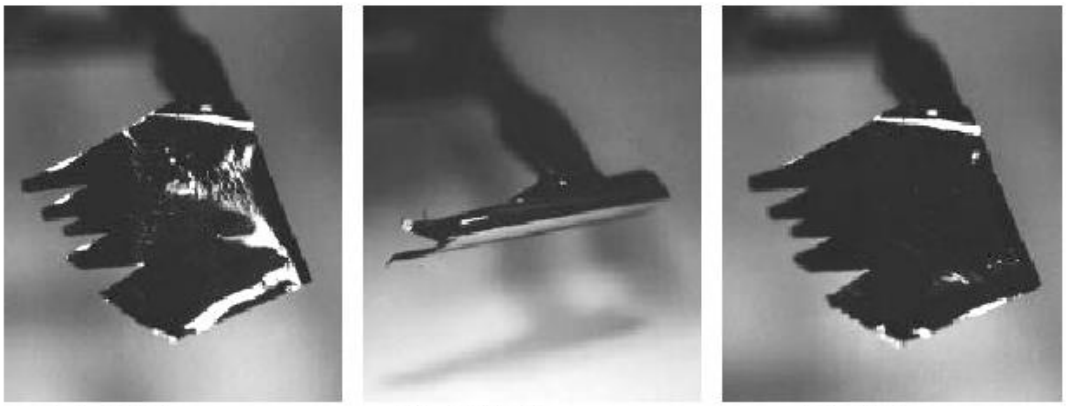


Şekil 2.22. Metal Boru Bağlantıların Kaynaksız Birleştirilmeleri [63].



Şekil 2.23. NiTiNol bağlantı elemanı [10]

NiTi şekil hafızalı alaşımların kaplama alanında ince film olarak kullanılması alaşımın üç boyutlu şekil değişimine neden olmasıyla kaplama teknolojisine yeni bir bakış kazandırmıştır. Taban malzeme üzerine magnetron sıçratma yöntemiyle NiTi kaplama çalışması buna örnek gösterilebilir. Düz şekliyle 25 ºC' de olan alaşımın sıcaklığı 150 ºC' ye çıkarıldığında kendiliğinden kapanmakta, kaplamanın sıcaklığının tekrar 25 ºC' ye çekilmesiyle de yeniden eski şekline geri dönmektedir. Şekil 2.24' te uygulanan kaplama gösterilmiştir [53].



Şekil 2.24. Sıçratma yöntemi kullanılarak elde edilen NiTi ince film [53]

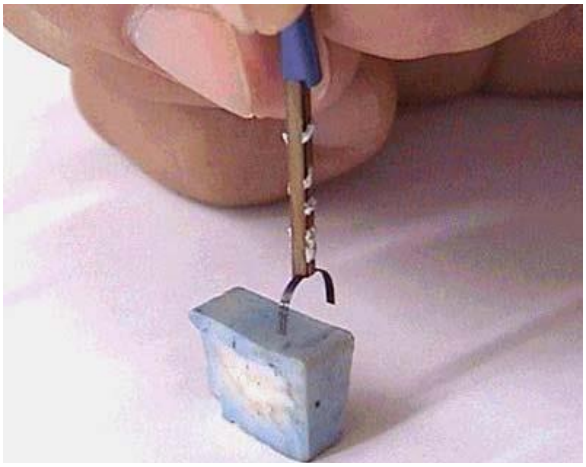
Magnetron sıçratma tekniği kullanılarak Telli tarafından yapılan çalışmada ise kaplamanın sıvı azot içesinde ve oda sıcaklığında hareketi tespit edilmiştir [53].

Şekil hafızalı alaşımların süperelastik özelliği endüstri alanında birçok malzemenin daha iyi kullanımına olanak sağlamıştır. Cep telefonu anteni ve gözlük çerçevesi gibi malzemelerin plastik şekil değişimleri sorun teşkil etmektedir. Bunun önlenmesi adına kullanılan şekil hafızalı alaşımlar bu soruna çözüm olmuş, hafif olmasının yanında da iyi bir korozyon direnci sağlamıştır. NiTi şekil hafızalı alaşımla üretilen telefon anteni Şekil 2.25' te verilmiştir [53].



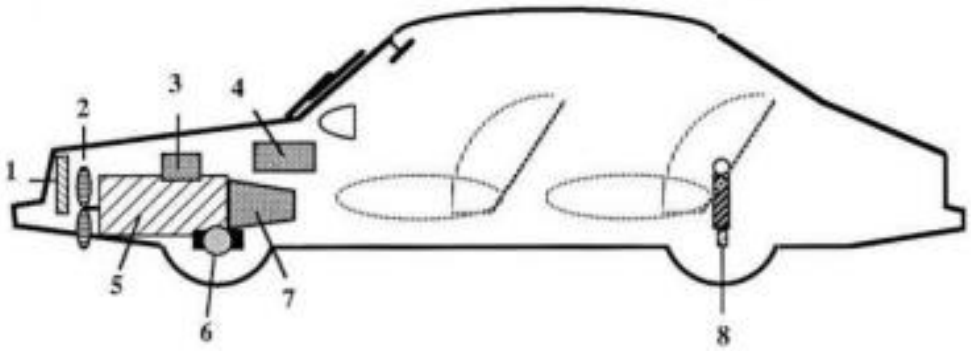
Şekil 2.25. NiTi alaşımın süperelastik özelliği kullanılarak üretilen cep telefonu anteni [53]

Şekil 2.26' da NiTi şekil hafızalı alaşım kullanılarak geliştirilmiş küçük malzemelerin kolayca taşınmasına imkân sağlayan mikro tutucu gösterilmiştir.



Şekil 2.26. NiTi şekil hafızalı alaşım kullanılarak geliştirilmiş mikro tutucu [53]

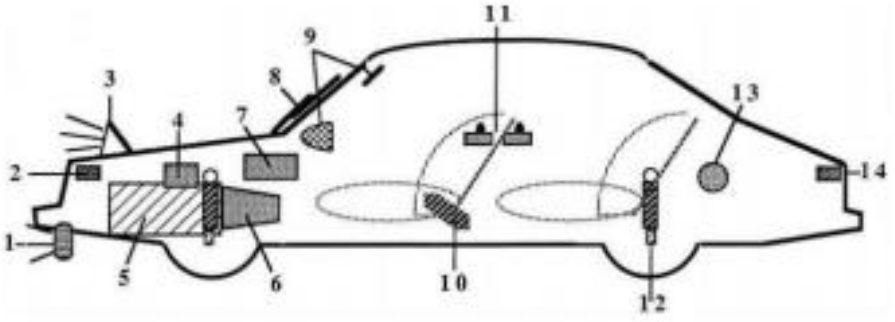
Endüstri sektöründe NiTi şekil hafızalı alaşımların aktüatör olarak kullanılması geniş yer bulmaktadır. Sıkıştırma yayı, tel, gerilim yayı manivela gibi şekil hafıza özelliği bulunan aktüatörler elektrik ve termal tahrik sistemlerinde kullanılmaktadır. Aktüatör olarak en yoğun kullanıldığı yer otomotiv sektörüdür. Otomobillerde kullanılan termal aktüatörler Şekil 2.27' de gösterilmiştir [10].



1) Radyatör panjuru, 2) Fan clutch, 3) Yakıt yönetimi, 4) Klima kontrol, 5) Motor kontrol, 6) Fren havalandırma, 7) Şanzıman kontrol/gürültü azaltma, 8) Süspansiyon ayarlama

Şekil 2.27. Otomobillerde kullanılan şekil hafızalı aktüatörlerin potansiyel uygulamaları [10]

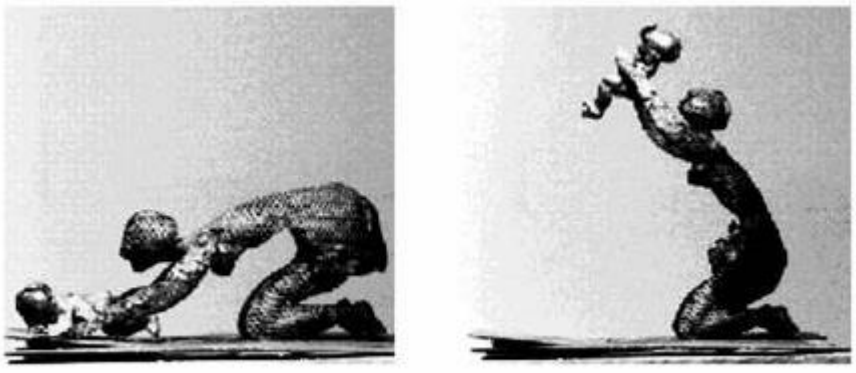
Şekil 2.28' de verildiği gibi elektrikli şekil hafızalı aktüatörler de otomotiv sektöründe oldukça fazla kullanım alanına sahiptir [10].



1) Sis lambası koruyucusu, 2) Motor kaput kilidi, 3) Geri kapanabilir ön far, 4) Yakıt yönetimi, 5) Motor kontrol, 6) Şanzıman kontrol, 7) Klima kontrol, 8) Silecek basınç kontrol, 9) Geri görüş aynası ayarı, 10) Emniyet kemeri ayarı, 11) Merkezi kilit sistemi, 12) Şok emici ayarı, 13) Benzin deposu kilit, 14) Bagaj kilit

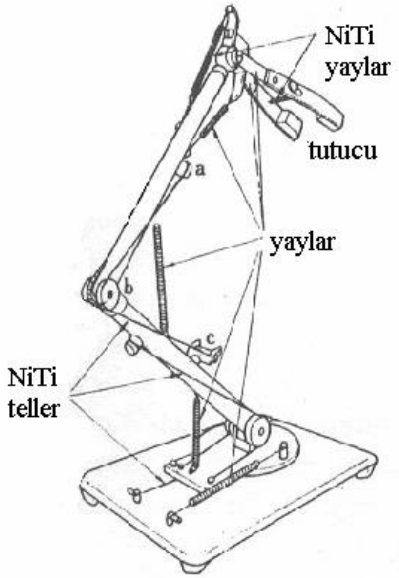
Şekil 2.28. Otomobillerde kullanılan elektrikli potansiyel şekil hafızalı aktüatörler [10]

Şekil hafızalı alaşımlar bulunduğu ortamın sıcaklığına göre değişen heykel ve figür çalışmalarında da kullanılır. Şekil 2.29' da gösterilen kadın ve bebek figürü, ortam sıcaklığının artmasıyla hareket edip dizlerinin üstünde doğrulmakta, ortam sıcaklığının düşmesi ile de eski halini almaktadır. Bu çalışma Fransız heykeltıraş Olivier Deschamps tarafından gerçekleştirilmiştir [53].

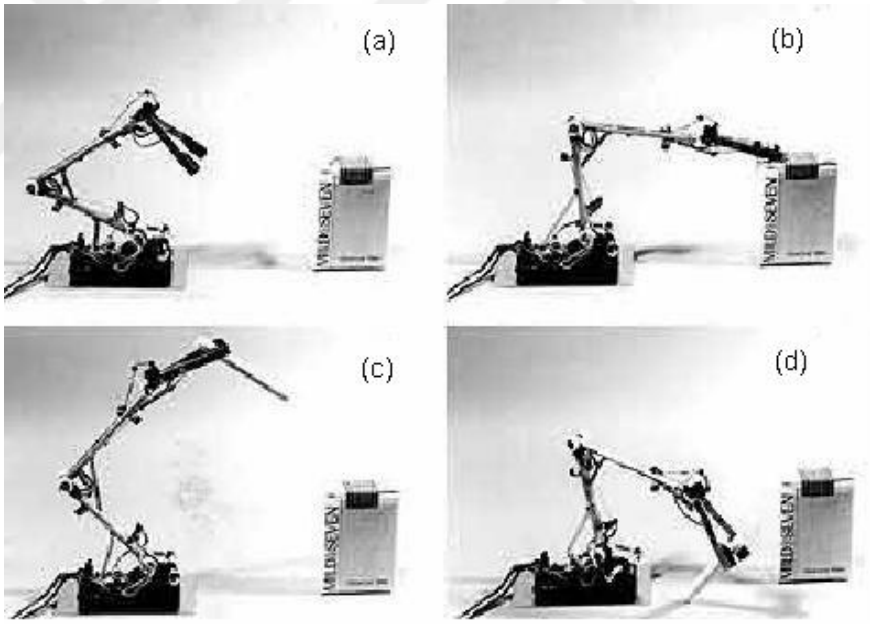


Şekil 2.29. Heykeltraş Olivier Deschamps tarafından yapılan kadın ve bebek figürü [53]

NiTi alaşımlı tel ve yaylar kullanılarak Şekil 2.30' da gösterilen prototip mikro robot geliştirilmiştir. Bu robot elektrik akım darbeleriyle kontrol edilir. Dirseklerinde bulunan teller ve yaylar sayesinde karşısındaki cisme yaklaşmakta, tutucu kısmındaki yay sayesinde sıkıştırma ve bırakma işlemini kontrollü olarak gerçekleştirir. Mikro robotun yaptığı bu hareketler Şekil 2.31' de gösterilmiştir [53].

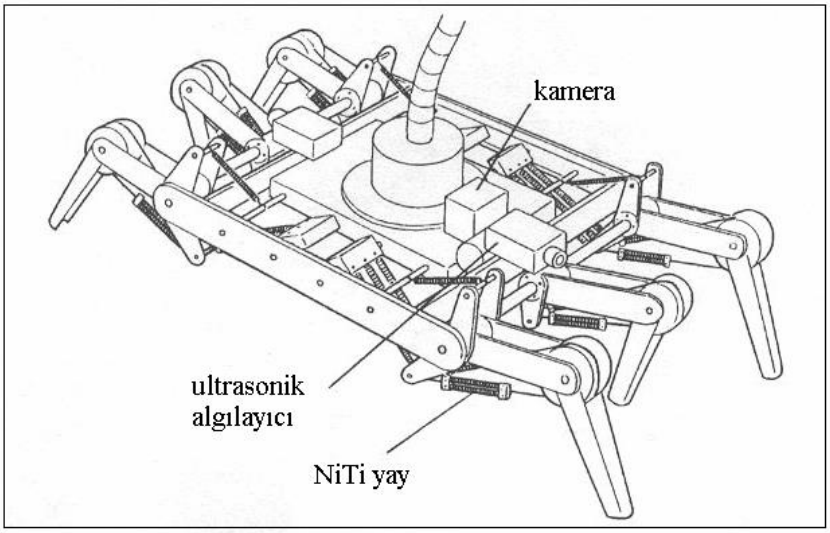


Şekil 2.30. NiTi alaşımların hareketlendirici olarak kullanıldığı mikro robot [53]



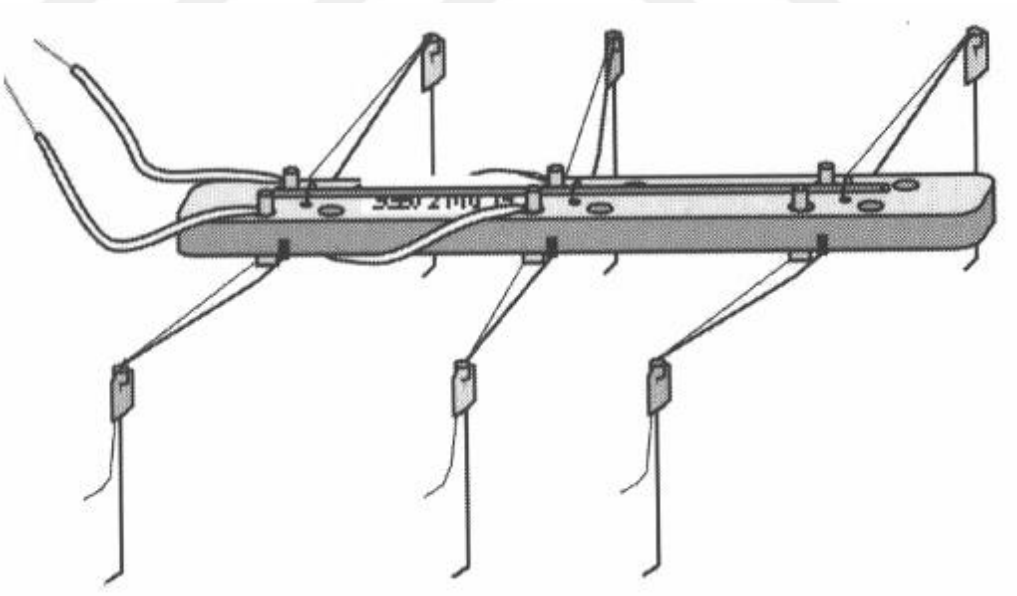
Şekil 2.31. Şekil hafızalı alaşımların kullanıldığı mikro robotun hareketi [53]

Şekil 2.32' de gösterilen altı bacaklı yengeç robot jeolojik araştırmalar ve sualtı çalışmaları için tasarlanmıştır. Sualtı sistemlerinde kullanılan elektrik motorlu veya hidrolik hareketlendirici sistemler deniz suyu kaçağına karşı korumaya ihtiyaç duyarlar. Bunun aksine NiTi şekil hafızalı alaşımlar yüksek korozyon dayanımına sahip olduğu için bu korumaya gerek duymazlar. Sistem elektrik akımı ile ısıtma ve deniz suyu ile soğutma şeklindeki hareketlenme ile gerçekleşir [53].



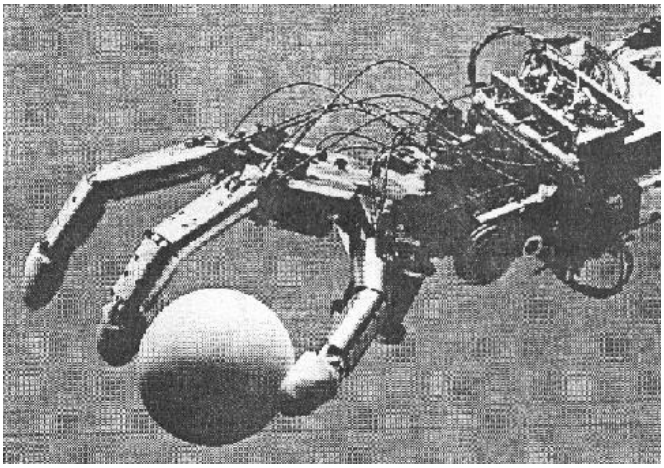
Şekil 2.32. NiTi yayların kullanıldığı altı bacaklı robotik yengeç [53]

Şekil 2.33' te NiTi alaşımlı teller kullanılarak altı bacaklı Squito robot böcek geliştirilmiştir. Bacaklardan her birini kontrol eden tellerden periyodik olarak elektrik akımı geçirilmesiyle robot ilerlemeye başlamaktadır [53].



Şekil 2.33. NiTi teller kullanılarak tasarlanan Squito robot böcek [53]

Şekil hafızalı alaşımlar kullanılarak insan eli benzeri biyomekanik robot eller tasarlanmıştır. Şekil 2.34' te Hitachi tarafından geliştirilen dört parmaklı robot el gösterilmiştir. Parmaklar içerisindeki NiTi şekil hafızalı tellerin ısınması ile hareket sağlanır. Bu sayede kavrama-bırakma gerçekleşir [53].

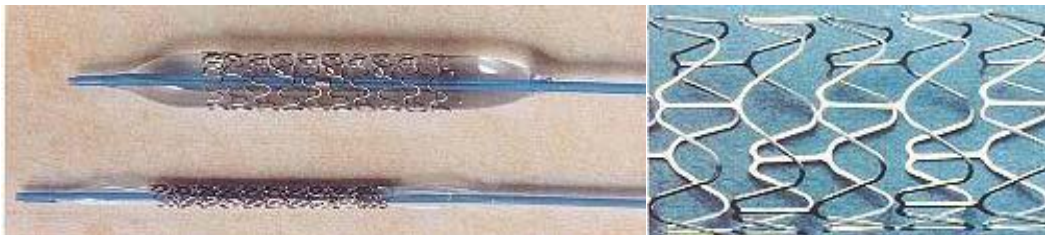


Şekil 2.34. NiTi şekil hafızalı teller kullanılarak geliştirilen Hitachi robot el [53]

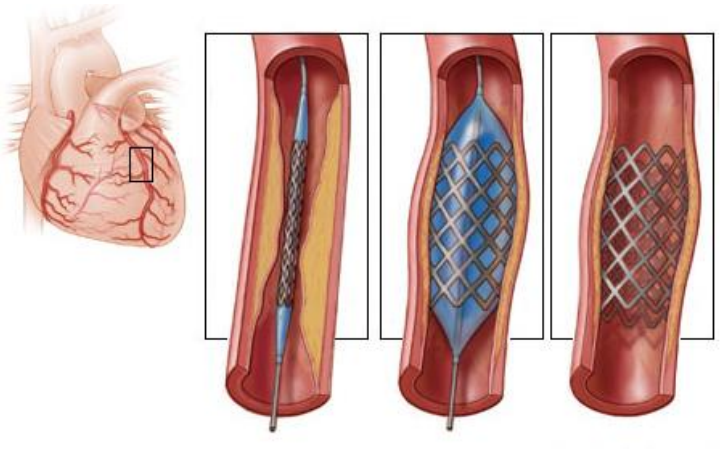
2.4.2. Tıp ve Medikal Uygulama Alanları

NiTi şekil hafızalı malzemeler insan bedeni ile uyum sağlayabildiğinden birçok medikal uygulamada tercih edilirler. Korozyona karşı mükemmel direnç sağlamaları, dayanımlarının iyi olması ve ilk şeklini hatırlayabilmeleri gibi özelliklerinden dolayı insan vücudunda kullanılan pek çok biyomalzemenin yerine geçmiştir. NiTi alaşımlar ortodontide diş tellerinde, kalp damar cerrahisinde stentlerde, medikal uygulamalarda ise katerlerde kullanılmaktadır [45].

NiTi alaşımlı stentler, kardiyolojik uygulamalarda kalp damar tıkanıklıklarının ameliyatsız olarak tedavi edilmesinde kullanılır. Şekil 2.35' te gösterildiği gibi stentler, radyal bir yay şekline sahiptir. Bir baloncuk vasıtasıyla damardaki tıkanıklığın olduğu bölgeye martenzitik yapıda büzülmüş olarak yerleştirilir. Baloncuğun çekilmesinin ardından şekil hafıza özelliği gösteren stent, vücut sıcaklığına ulaşmasıyla birlikte dönüşüm göstererek genişler. Bu sayede damar iç cidarının genişlemesiyle tıkanık olan kalp damarı büyük oranda ameliyatsız olarak açılmış olur. Şekil 2.35 ve Şekil 2.36' da kalp damarının stentle açılması gösterilmektedir [53].

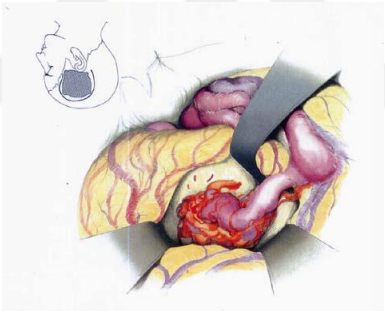


Şekil 2.35. Damar tıkanıklığında kullanılan NiTi stent örnekleri [64]

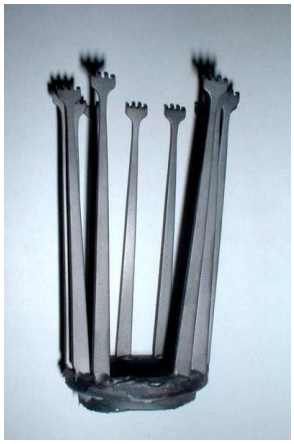


Şekil 2.36. Tıkanık olan damarın NiTi stentle açılması [65]

Beynin çeşitli loblarını incelemek için beyin cerrahisinde NiTi şekil hafızalı spatula kullanılır. Spatula beyin lobuna sokulduğunda spatulanın uç kısmı şekil hafıza etkisi göstererek iç tarafa doğru kıvrılmasıyla beynin iyi bir şekilde kavranması sağlanır. Bu uygulama Şekil 2.37' de gösterilmiştir [66].

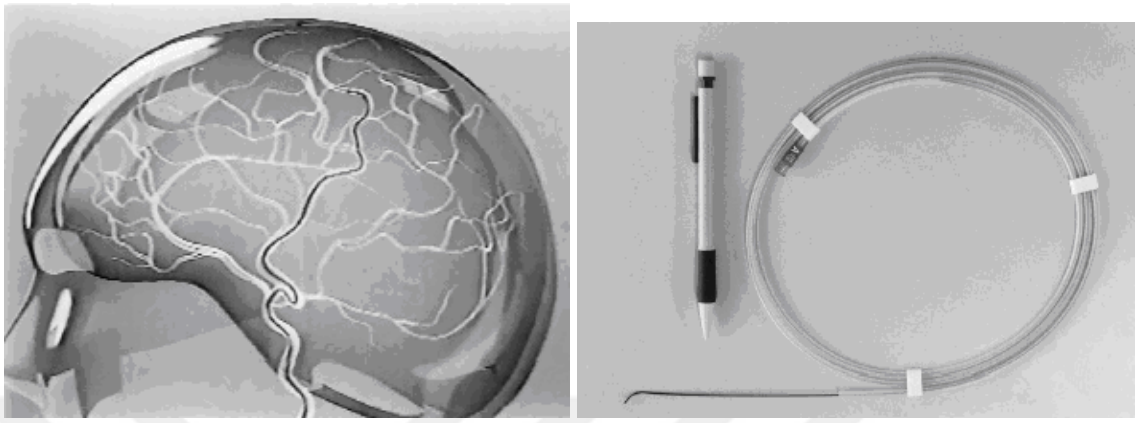


Şekil 2.37. Beyin cerrahinde NiTi şekil bellekli spatulanın kullanılışı [66]



Şekil 2.38. Beyin cerrahinde kullanılan NiTi şekil bellekli spatula [66]

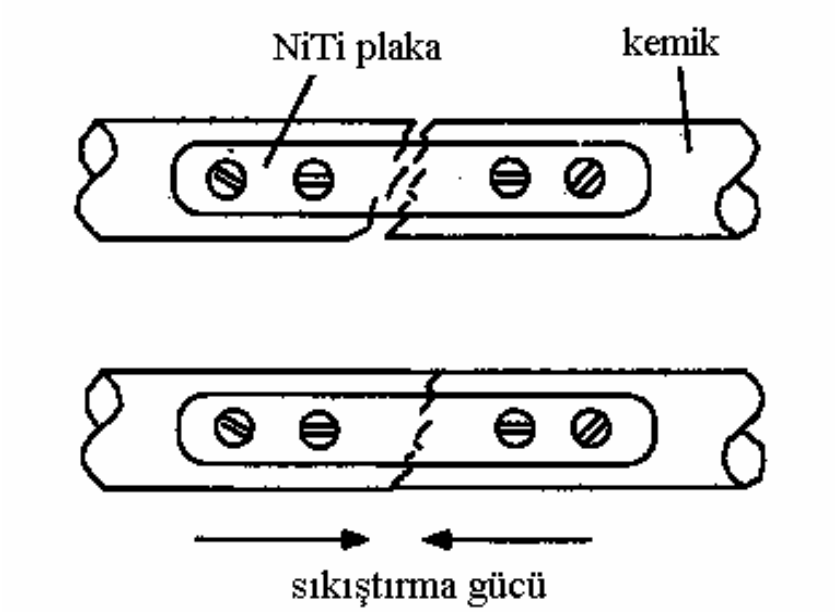
Ayrıca beyne ait klavuz tel olarak kullanılan bir başka uygulama Şekil 2.39' da gösterilmiştir.



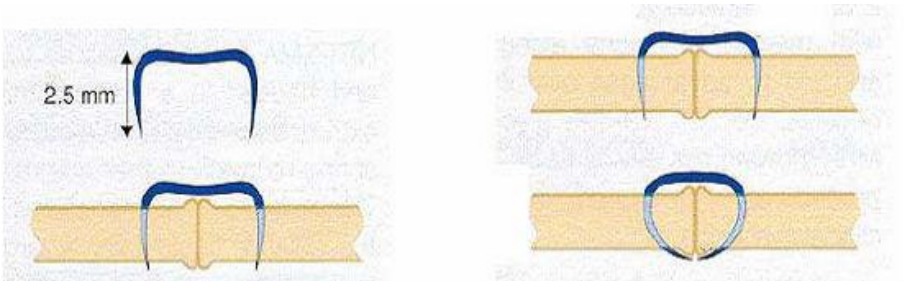
(a) Beyne ait bir uygulama (b) Kılavuz telin görünümü

Şekil 2.39. Medikal uygulamalarda kullanılan kateterler için süperelastik klavuz tel [67]

NiTi şekil hafızalı alaşımların ortopedik alandaki uygulamaları geniş yer tutmaktadır. Kırılan kemiklere vidalanan NiTi şekil hafızalı plakalar vücut sıcaklığına geldiğinde iki parçayı sıkıştırmaya yönelik bir kuvvet uygular. Bu sayede kırılmış olan kemiğin birleşmesi sağlanmaktadır [59].



Şekil 2.40. NiTi şekil hafızalı alaşımların ortopedik kullanımı [2]



Şekil 2.41. Kırık kemiklerin birleştirmede kullanılan NiTi bağlantı plakaları [59]

Ortopedik alanda değişik tipteki şekil hafızalı zımba teli şeklinde kullanılan malzemeler kırılan kemiklerin iyileşmesini hızlandırmada önemli rol oynar. Açık halleri ile bölgeye yerleştirilen zımba telleri dışarıdan özel bir cihazla sağlanan ısıtma ile kapanmaya ve kemik parçalarına baskı uygulamaya başlar. Bu sayede tedavi gerçekleşir. Kırılan ayağa takılan zımba teli Şekil 2.42' de verilmiştir [67].



Şekil 2.42. Ortopedik zımba telleri [67]

Göz çukuru, yüz bölgesi, çene gibi herhangi bir kalıbın uygulanması mümkün olmayan yerlerde kullanılan şekil hafızalı plaka ve onun vidası Şekil 2.43' te verilmiştir. Vidalar vasıtasıyla kırılan yerlere plakalar yerleştirilir. Bu sayede kemikler orijinal şeklinde tutulmuş aynı zamanda yenilenen hücresel oluşuma müsaade edilmiş olur [67].



(a) (b)

Şekil 2.43. Şekil hafızalı kemik plakaları: (a) Bir insan çenesine tutturulmuş plaka (b) Plaka ve vida detayı [67]

Ortopedik alanda en ilginç uygulamalardan bir tanesi de uzun kemik bozukluklarının NiTi şekil hafızalı çubuklarla düzeltilmesidir. Şekil 2.44' te gösterildiği gibi A' da kemiğe uygulanmış NiTi çubuk düz olan ilk şekline dönmek için kemiği C' de gösterilen şekline zorlamaktadır [10].



Şekil 2.44. NiTi çubuk uygulaması [10]

Uzun kemiklere benzeyen bir uygulama da Şekil 2.45' te gösterilmiştir. Vertebral skolyoz sabitlenmiş NiTi çubuklar ile anatomik şekline döndürülmeye çalışılmaktadır [10].



Şekil 2.45. NiTi şekil hafızalı çubukların vertebral uygulaması [10]

Ortodontik tedavide günümüzde farklı tel alaşımları kullanılmaktadır. Tel seçiminde, uygulanacak olan kuvvetin miktarı telin çalışma aralığı, elastiklik özelliği, şekil verilebilirliği önemli faktörlerdendir [68].

Ortodontik diş telleri dış kuvvet uygulayarak çarpık dişlerin düzeltilmesinde kullanılır. Dişe tutturulan tellerin performansı, dişlerin hareketiyle bu kuvvetin azalmaması ile ölçülebilir. Genel olarak kullanılan paslanmaz çelik teller, elastik bölgede şekil değişimine uğradıklarında kuvvet uygulama özelliklerini yitirirler ve yeniden

değiştirilmeleri gerekir. Bunlara kıyasla NiTi şekil hafızalı diş tellerinin daha yüksek kuvvet uygulama özelliği ile değiştirilme sıklıkları çok çok düşüktür [53].



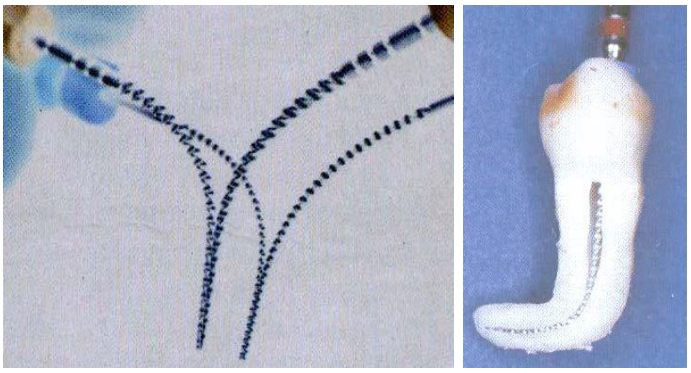
Şekil 2.46. Ortodontide NiTi diş teli örnekleri ve uygulaması [53]



Şekil 2.47. NiTi diş teli uygulaması [69]

Diş hekimliğinde endodontik kanal tedavisinde NiTi şekil hafızalı döner kök kanalı aletleri kullanılmaktadır. Yüksek elastik deformasyonu sayesinde NiTi kanal aletleri

paslanmaz çelik döner aletlerinin yerini almaktadır. NiTi döner kök kanalı aletleri bükülme ve torsiyona karşı iki ya da üç kat daha fazla esneyebilmektedir [53].



Şekil 2.48. Endodontik uygulamalarda kullanılan NiTi döner kök kanalı aleti [53]



Şekil 2.49. Endodontide kullanılan döner kanal aletleri [70]

Günümüzde büyük deformasyonlara karşı dayanıklı süperelastik NiTi alaşımdan yapılmış gözlük çerçeveleri üretilmektedir [71]



Şekil 2.50. NiTi' den yapılmış gözlük çerçevesi ve süperelastiklik özelliği [67]

2.4.3. Havacılık ve Uzay Teknolojisi Uygulama Alanları

Şekil hafızalı alaşımlar medikal ve endüstriyel uygulamaların yanı sıra havacılık sektöründe de kullanılmaktadır.

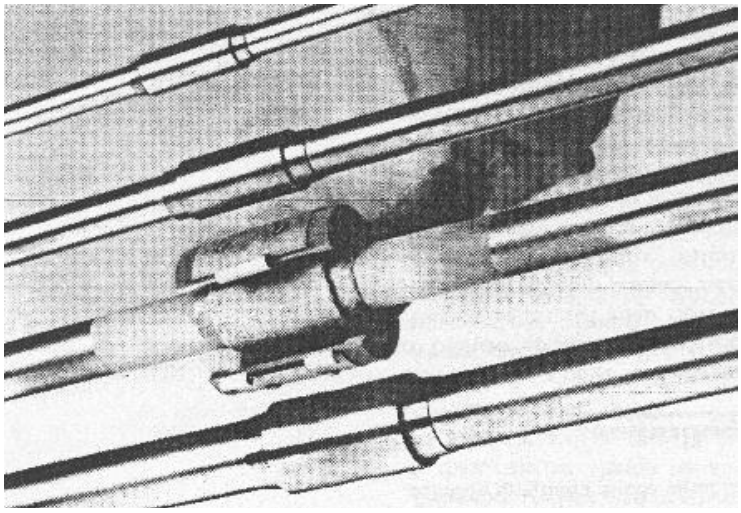
NiTi şekil hafızalı alaşımların en çok kullanıldığı alanlardan bir tanesi de uzay anten sistemleridir. Düşük sıcaklıkta paket olarak bir yere ulaştırılan antenin ısınması ile normal anten şeklini aldığı uygulamalar ilk uygulamalardan sayılır. Ayrıca uzay uydu sistemlerinde uydu kanatçıklarında da kullanılırlar [45].

Uçak motorlarında çevron problemini farklı bir yaklaşımla çözmek için, üzerine şekil hafızalı alaşımlar yerleştirilerek etkili iç bükme momenti oluşturuldu.



Şekil 2.51. Şekil hafızalı alaşımlar sayesinde içe bükülmeye zorlanan değişken geometrili çevron [72]

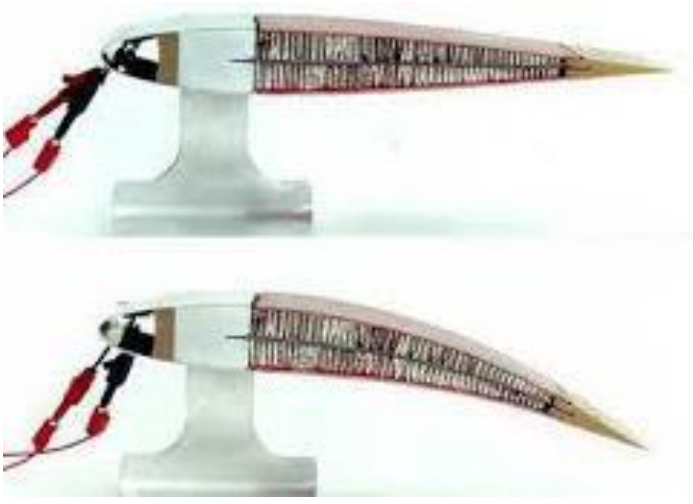
NiTi şekil hafızalı alaşımların ilk kullanım yerlerinden biri 1969 yılında F-14 Jet uçaklarında hidrolik boruların bağlama bileziği olarak kullanımı olmuştur. Normal kaynak tekniklerinin kullanımının zor olduğu alüminyum gövdeye yakın olan yerlerde olan hidrolik borular şekil hafıza özelliği kazandırılmış NiTi bilezik ile bağlanmıştır. Sıvı nitrojen içerisinde martenzitik fazda bulunan bilezik, hidrolik boruların üstüne takıldığında ortam sıcaklığına ulaşılmasıyla sıkı bir şekilde oturmuş olur. Bilezik sıvı nitrojenin içindeki çok düşük sıcaklığa artık ulaşamayacağı için her zaman sıkı olarak kalır [53].



Şekil 2.52. NiTi şekil hafızalı alaşımın hidrolik boru bağlama bileziği olarak kullanılması [53]

Son yıllarda süpersonik uçakların dış yüzeyinde basınçtan kaynaklı büzülmelerin önlenmesi için NiTi şekil hafızalı alaşım gömülü grafit-epoksi kompozit malzeme kullanımının araştırılması devam eden çalışmalardandır [53].

Şekil hafızalı alaşımlar havacılık teknolojisinde uçak kanatlarındaki kontrol yüzeylerinin yapımında kullanılmaktadır. Şekil hafızalı alaşım kullanılarak tasarlanmış kanatçıklar Şekil 2.53' te gösterilmiştir [73].



Şekil 2.53. Şekil hafızalı malzemeden yapılan kuyruk kanatçığı [73]

Şekil hafızalı alaşımlarla üretilen aktüatörlerle doğal kasın çalışmasına benzeyen hareketlenme sağlanmaktadır. Şekil hafızalı aktüatörlerden hareket elde etmek için ısıtılmaları gerekir. Farklı ısıtma yöntemleri kullanılabileceği gibi şekil hafızalı alaşımdan yapılmış tellere elektrik uygulayarak ısıtılması gerçekleşir. Şekil hafızalı

aktüatör gruplarının kontrollü bir şekilde kullanılabilmeleri bu sayede mümkün olmaktadır [73].

Şekil hafızalı teller ile kontrol edilen adaptif winglet Şekil 2.54' te gösterilmekte ve hava akışına göre en uygun durumda tutulur. Düz kanatlarla karşılaştırıldığında Rijit wingletler uçağın performansını % 5-11 oranında artırır. Winglet sayesinde kanat arkasında serbest dağılan girdap alanlarının akış alanına yönlenimi sağlanır [10].

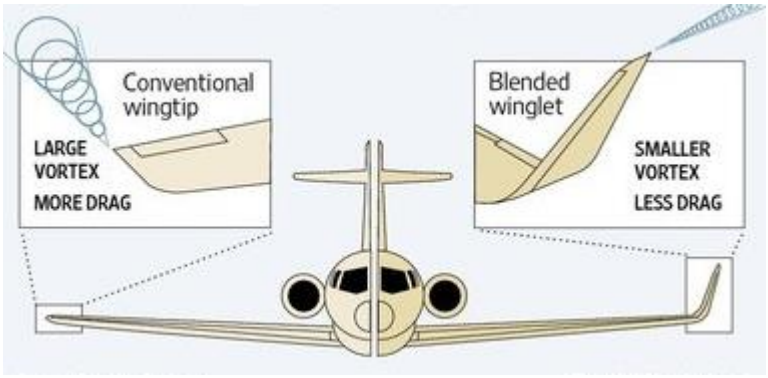


Şekil 2.54. Winglet [10]

Wingletler sürtünmeyi azaltarak daha iyi bir hava akışı sağlar. Kanat altındaki yüksek basınçtan dolayı kanat ucundaki hava alttan kanadın üstüne doğru hareketlenir. Bu da vortex akımlarını oluşturur. Şekil 2.55' te gösterildiği gibi winglet kullanımı bu oluşumu büyük oranda azaltmaktadır.



Şekil 2.55. Modern uçaklarda kullanılan winglet [74]



Şekil 2.56. Düz kanat yapısına kıyasla winglet kullanımının etkisi [75]

Adaptif wingletlerin kullanımı sayesinde bu akımlar uçuş durumuna göre uygun olarak ayarlanabilecektir. Optimumda bir aktüatör gerginliği gereklidir. En düşük gerilme östenit fazda oluşurken maksimum gerilme martenzit fazda meydana gelir. Bu sıradaki tüm deformasyonlar aktüatörlerin elektrik yolu ile ısıtılması ve çevreleyen hava akımı yoluyla da soğutulması sağlanabilir. Pnömatik, hidrolik ve elektiriki aktüatörlere nazaran şekil hafızalı alaşımların düşük ağırlıkta, dar mesafelerde kullanımının uygunluğu, karmaşık olmayan yapısı ve düşük fiyatı ile öne çıkmaktadır[10].

Benzer şekilde winglet mantığına benzeyen bir çalışma sistemine sahip akıllı kanat yapmak için bilim adamları çalışma yürütmektedir. Deneysel olarak çalışılan model Şekil 2.57' de verilmiştir [10].



Şekil 2.57. Akıllı kanat [10]

Uzay teknolojisinde şekil hafızalı alaşımlar kullanılmaktadır. Hubble uzay teleskopu uzaya ulaştığında güneş panellerinin serbest kalması gerekmektedir. Bu da şekil hafızalı alaşımdan yapılmış kollar ile mümkün olmuştur. İlk başta düşük sıcaklıktaki uzay aracının içine paketlenen teleskopun güneş panelleri içe doğru bükük katlı halde kalmıştır. Uzayda güneş ışınları hızlı bir şekilde uzay aracını ısıtınca, şekil hafızalı

kollar belli sıcaklığın üstünde yaklaşık olarak 115 °C' de otomatik olarak orijinal şekline açılmıştır. Hubble uzay teleskopu Şekil 2.58' de gösterilmiştir [10].



Şekil 2.58. Hubble uzay teleskopunun güneş panelleri açık-kapalı iken görüntüsü [10]

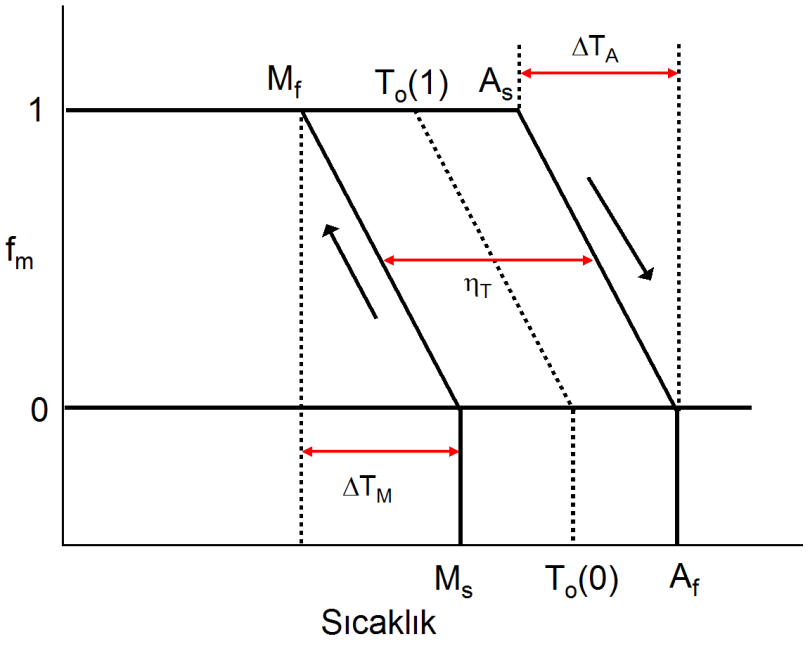
BÖLÜM 3

TERMODİNAMİĞİN ŞEKİL HAFIZAYA ETKİSİ

3.1. Şekil Hafıza Özelliklerinin Termodinamiği

Şekil hafızalı alaşımlar, tersinir deformasyon özelliklerini termo-elastik faz dönüşümünden almaktadırlar. Termo-elastik martenzitik dönüşümü, şekil hafızalı alaşımlarda değişik etkiler (sıcaklık, manyetik alan, gerilme) tarafından başlatılabilen, geri döndürülebilir, katıdan katıya bir faz dönüşümüdür. Bu faz dönüşümünde, östenit ile martenzit arasında küçük bir hacim değişikliği ile beraber şekil değişimi söz konusudur. Bu dönüşüm, termodinamik olarak östenit ve martenzit arasında oluşan Gibbs serbest enerji farkından kaynaklanır ve bu enerji farkı, faz dönüşümü için gerekli olan kimyasal itici gücü oluşturmaktadır [76-77].

Şekil 3.1' de ise sabit gerilme altındaki ısıtma-soğutma ile elde edilen şekil hafıza etkisi grafiğini şematik olarak ifade etmektedir. Bu grafikte M_s martenzit fazına geçiş başlangıç sıcaklığı, M_f martenzit fazına geçiş bitiş sıcaklığını gösterirken, A_s östenit fazına geçiş başlangıç sıcaklığı ve A_f östenit fazına geçiş bitiş sıcaklığını göstermektedir.



Şekil 3. 1. Sabit gerilme altında ısıtma-soğutma ile elde edilen şekil hafıza etkisinin şematik gösterimi [78]

Şekil 3.1' de görülen y-ekseni, dönüşümün bir derecesi olan martenzit hacim oranını (f_m), x-ekseni ise dönüşüm için itici güç olan sıcaklığı göstermektedir. Grafikte $f(0)$ martenzit dönüşümünün başlama anındaki hacim oranını, $f(1)$ ise martenzit dönüşümünün bittiği andaki hacim oranını ifade etmektedir. Dolayısı ile bu değerler 0-1 arasında değişmektedir. Martenzitik dönüşüm için itici güç sıcaklık, gerilme ya da manyetik alan olabilir [79]. Şekil 3.1' de gösterilen davranış için üç temel parametreden bahsedilebilir; denge sıcaklığı T_o, dönüm sıcaklık aralığı ΔT ve dönüşüm sıcaklık histerezisi η_T. Bu grafikte ΔT değerinin ileri ve geri faz dönüşümleri için aynı olduğu kabul edilmiştir.

ΔT, faz dönüşümünün tersinir olmasından, η_T ise bu dönüşümün temelinde olan histerezisten kaynaklanmaktadır. Faz dönüşüm sıcaklıkları, yukarıda bahsedilen üç temel parametre kullanılarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$M_f = M_s - \Delta T \qquad (1)$$

$$M_s = T_o - \frac{1}{2}\eta_T \qquad (2)$$

$$A_s = T_o + \frac{1}{2}\eta_T \quad (3)$$

$$A_f = A_s + \Delta T \quad (4)$$

Termo-elastik martenzitik faz dönüşümlerinin hem sıcaklığa hem de kuvvete duyarlı olmasından dolayı termo-mekanik bir olay olarak adlandırılır ve kendine özgü termodinamik parametreler ile ifade edilmesi gerekir. Şimdiye kadar bu konuda birçok çalışma yapılmış ve şekil hafıza davranışlarının termodinamik olarak modellenmesi amacıyla çeşitli teoriler ortaya çıkmıştır. Bu teoriler iki temel gruba ayrılır.

i) Denge termodinamik teorisi [20]

ii) Fenemolojik termodinamik teorisi [21]

Bu çalışmada daha çok fenemolojik termodinamik teori ile modelleme yapılacaktır. Fenomonolojik termodinamik teorisi, Şekil 3.1' de gösterilen ve faz dönüşümü sırasında gözlemlenen histerezisli davranıştan esinlenerek ortaya çıkmıştır ve termo-elastik martenzitik faz dönüşümlerini modellemek için kullanılır. Dönüşüm sırasında gözlemlenen ileri ve geri dönüşüm sıcaklıkları arasındaki fark histerezis olarak ifade edilmektedir. Histerezis, faz dönüşümünün tamamlanabilmesi için itici gücün sisteme sürekli enerji olarak ilave edilmesi gerektiğini ve buda malzemelerin içinde faz dönüşümüne karşı bir direncin olduğunu gösterir. Dönüşüme karşı gösterilen bu direnç, aynı dönüşümün kendisi gibi geri kazanılabilir özelliğe sahiptir. Yani hem östenit-martenzit ve hem de martenzit-östenit faz dönüşümlerinde görülür. Termo-elastik martenzitik dönüşümler için bu direncin nedeni depolanan ve geri salınan elastik şekil değişim enerjisi olarak ifade edilmektedir [20,79]. Böylece, şekil hafızalı alaşımlarda faz dönüşümü, değişik faktörler hesaba katılarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta G_{total} = \Delta G_c + \Delta G_{nc} = \left[\Delta H - T\Delta S\right] + \left[\Delta G_{el} + \Delta G_{irr}\right] \quad (5)$$

Denklemde, ΔG_{el} elastik şekil değişim enerjisini ifade etmektedir. Elastik şekil değişim enerjisi ileri faz dönüşüm sırasında depolanır ve malzemenin içyapısındaki martenzit hacim oranı arttıkça, yani dönüşüm oranı arttıkça artar. Depolanan elastik şekil değişim

enerjisi, geri dönüşüm sırasında martenzit hacim oranının azalması ile birlikte salınır ve bundan dolayı negatif işaret alır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta G_{el}^{A\to M} = -\Delta G_{el}^{M\to A} \qquad (6)$$

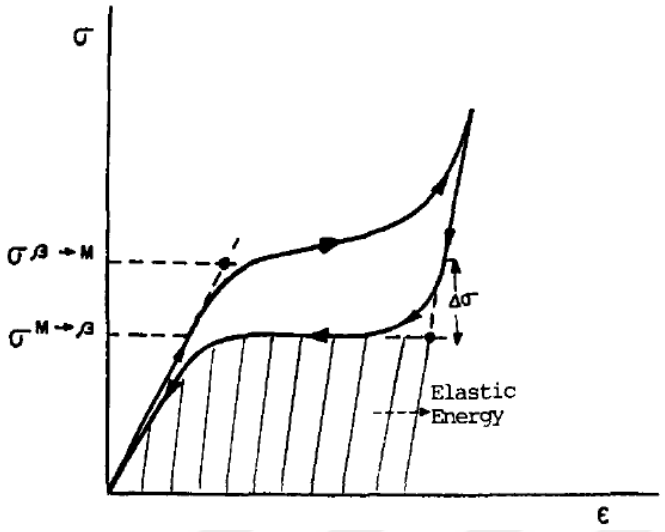
ΔG_{irr} terimi termo-elastik faz dönüşümü sırasında geri kazanılamayan tüm enerjilerin toplamını ifade eder ve bu değer alaşım sistemine ve bu sistemin metalürjik özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Örneğin malzemenin içyapısı faz dönüşümü sırasında iç sürtünmelere neden olacak şekilde ise bu değer artabilir. Teorik olarak dönüşüm sırasında bu değerin sabit olduğu ve elastik enerji gibi martenzit hacim oranına göre değiştiği kabul edilir. Aksi kanıtlanmadığı sürece, ileri ve geri faz dönüşümleri için ΔG_{irr} değerinin eşit olduğu varsayılır ve daima pozitif işaret alır.

$$\Delta G_{irr}^{A\to M} = \Delta G_{irr}^{M\to A} \qquad (7)$$

Görüldüğü gibi ΔG_{el} ve ΔG_{irr} terimleri martenzitik dönüşümlerin termodinamik analizlerinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Dolayısı ile bu iki terimin anlaşılması oldukça önemlidir. Aşağıdaki bölümlerde bu iki terim üzerinde biraz daha fazla durulacaktır.

3.1.1. Elastik Enerji

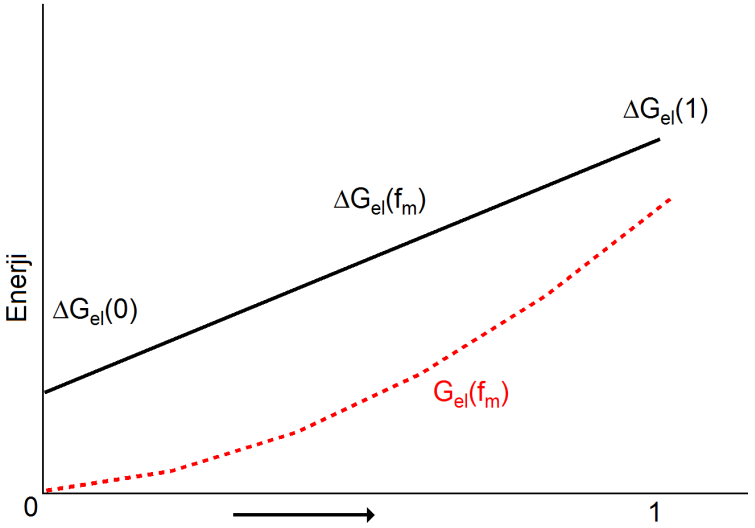
Termodinamik teorilerde kullanılan elastik enerji terimi ΔG_{el}, genelde dönüşüme katkı sağlayan tüm geri kazanılabilir enerjileri ifade eder. Bununla beraber, termo-elastik martenzitik dönüşümlerde malzemenin kafes yapısı deforme olmaktadır ve bu deformasyon ile sistemde depo edilen elastik şekil değişim enerjisi çok yakın ilgili olduğundan, bu terim yerine elastik şekil değişim enerjisi kullanılabilir. İleri faz dönüşümü sırasında elastik şekil değişim enerjisi sistemde depolanır ve depolanan enerji geri faz dönüşümünde çoğunlukla ısı enerjisi olarak salınır [76]. Şekil 3.2' de şekil hafızalı alaşımların süper-elastik davranışı sırasında sistemde depolanan elastik şekil değişim enerjisini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.2. Süperelastik davranış deneyinde elastik enerjinin gösterimi [80]

Gerilme-gerinim eğrisinin altında kalan taralı alan, malzemenin elastik şekil değişim enerjisini ifade etmektedir.

Şekil 3.3' te, $\Delta G_{el} = \frac{dG_{el}}{df_m}$ eşitliği ile ifade edilen bütün çizgi enerjisinin, dönüşen martenzit hacim oranının doğrusal bir fonksiyonu olarak değiştiğini göstermektedir.



Şekil 3.3. Elastik enerjinin martenzit hacim oranına göre değişimi [78]

Grafikteki kesikli çizgi faz dönüşümü boyunca depolanan $G_{el} = \int_0^{f_m} \frac{dG_{el}}{df_m} df_m$ elastik enerjiyi ifade etmektedir. Şematik gösterimden de anlaşılacağı gibi $\Delta G_{el}(0)$ ileri faz

dönüşümün başlangıç sıcaklığını (M_s) değiştirmekte ve ileri-geri dönüşüm arasında sıcaklık farkı oluşmasına neden olmaktadır. Bu grafikten de anlaşıldığı gibi faz dönüşüm oranı arttıkça depolanan elastik enerji miktarı da artmaktadır.

3.1.2. Tersinir Olmayan Enerji

Şekil hafızalı alaşımların faz dönüşümü sırasında salınan ve geri kazanılamayan enerji ΔG_{irr} temel olarak içyapıda meydana gelen iç sürtünmelerden kaynaklanmaktadır.

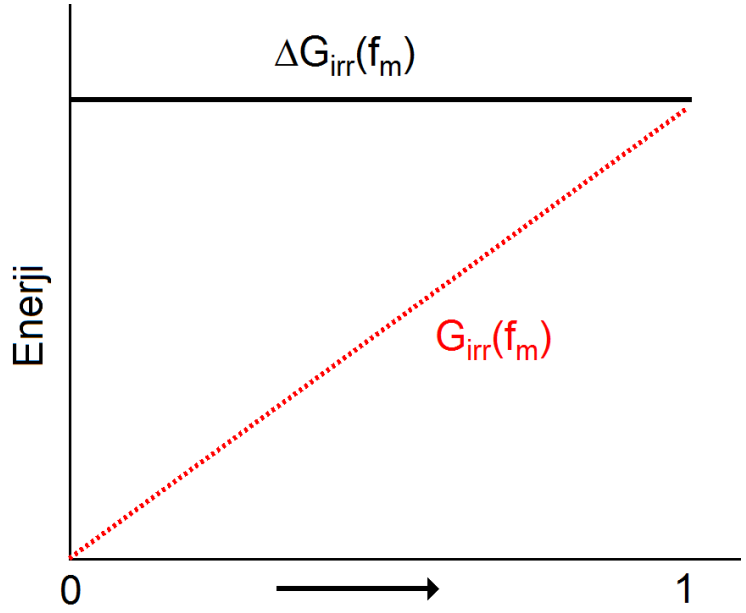
Faz dönüşümü sırasında oluşan dislokasyonlar, malzemenin iç enerjisini artırır ve bununla birlikte dönüşüm sırasında ilerleyen faz sınırının önünde bariyer oluşturarak hareketini engeller. Hareketi engellenen faz sınırı, ilerleyebilmek için dislokasyonların üzerinde baskı oluşturur. Bu baskı neticesinde dislokasyonlar itelenir ve bazıları kesilir. Bunun sonucu olarak da sürtünme oluşur ve ısı açığa çıkar [81].

Martenzitik dönüşümlerin kafes yapısının deforme olması ile oluştuğu bilinmektedir. Bu deformasyon sırasında, malzemenin içyapısında yerel olarak kalıcı olan plastik deformasyon görülebilir ve bunun sonucunda içyapıda dislokasyon hataları oluşabilmektedir. Oluşan dislokasyonlar malzemenin iç enerjisini artırabilir ve aslında dönüşüm serbest enerjisinin de salınmasına neden olmaktadır. Bu enerji salınımı, bilindiği gibi tersinir değildir ve şimdiye kadar birçok deneysel veri ile doğrulanmıştır [79]. Yapılan bazı çalışmalarda, şekil hafızalı alaşımlarda termal çevrim sonucunda malzeme içyapısında dislokasyon yoğunluğunun arttığı ve buna bağlı olarak dönüm sıcaklılarının değiştiği gözlenmiştir [82].

Diğer bir neden de akustik emisyon olarak söylenebilir. Martenzitik dönüşümler meydana gelirken malzemenin kafes yapısı deforme olur ve bunun sonucunda malzemede iç gerilmeler oluşabilir. Bu iç gerilmeler matrisin mekanik dayanımının üstünde bir değere ulaşırsa, martenzit fazı mekanik kafes dalgası olarak büyüyebilir. Bu büyüme bazı durumlarda ses hızında gerçekleşebilir ve etrafa akustik enerji salınabilir. Böylece depolanan elastik enerji salınmış olur.

Dönüşüm sırasında enerji salındığı için oluşan deformasyonu geri kazanmak için gerekli olan itici güç tükenmiş olur ve böylece termal histerezis oluşur [20]. Dönüşüm boyunca

salınan tüm spesifik enerji $\Delta G_{irr} = \frac{dG_{irr}}{df_m}$ ifadesi ile gösterilir ve dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesinde önemli rol oynar. Şekil 3.4' te tersinir olmayan enerjinin martenzit dönüşüm oranına göre değişim grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Tersinir olmayan enerjinin martenzit hacim oranına göre değişimi [78]

Salınan spesifik enerji (ΔG_{irr}), ileri ve geri faz dönüşümleri için sabit kabul edilmektedir (Şekil 3.4). Salınan tüm enerji (G_{irr}) dönüşüm sıcaklıkları ile doğrudan ilgili olmayıp, Şekil 3.4 deki gibi dönüşen martenzit oranına bağlı olarak değişmektedir. Martenzit oranı arttıkça salınan enerji miktarı da artar. Bu değişim yukarıda gösterilen elastik enerji ile benzerlik ifade etmektedir. Bununla birlikte, tersinir olmayan bu enerjilerin termodinamik olarak salındığı halde, faz dönüşümleri kristalografik ve mekanik olarak geri kazanılabilir.

3.1.3. Faz Dönüşümlerinin Termodinamik ile İfade Edilmesi

Yapılan bazı çalışmalar ile teorik olarak geliştirilen termodinamik modellerin uygulama ile desteklenmesi yoluna gidilmiştir. Ancak bu tür çalışmalar literatürde sınırlı miktarda bulunmaktadır. Buda bize şekil hafızalı alaşımların faz dönüşüm özelliklerini anlamak için birçok değişik etkenin hesaba katılması gerektiğini göstermektedir. Bu konuda ilk çalışmalar Ortin ve Planes [77] tarafından yapılmıştır.

Daha önceki bölümlerde salınan enerji den bahsedilmişti. Bu enerji termodinamik modelleme yapılırken hesaba katıldığı için östenit-martenzit ve martenzit-östenit faz dönüşümleri için ayrı denklemlerin yazılması gerekmektedir. Çünkü bu iki faz dönüşümünün başlaması ve devam etmesi için gerekli şartlar aynı değildir. Bu faz dönüşümleri için gerekli denklemler şu şekilde yazılabilir [79] .

$$\Delta G^{A\to M} = \Delta H^{A\to M} - T\Delta S^{A\to M} - \frac{1}{\rho}\sigma_{app}\varepsilon_t^{A\to M} + \Delta G_{el}{}^{A\to M}(f_m) + \Delta G_{irr}^{A\to M}(f_m) \quad (8)$$

$$\Delta G^{M\to A} = \Delta H^{M\to A} - T\Delta S^{M\to A} - \frac{1}{\rho}\sigma_{app}\varepsilon_t^{M\to A} + \Delta G_{el}{}^{M\to A}(f_m) + \Delta G_{irr}^{M\to A}(f_m) \quad (9)$$

Bu denklemlerde, entropi S ve entalpi H faz dönüşümleri için aynı değerde fakat zıt işaretlidir. Bundan dolayı,

$$\Delta H^{A\to M} = -\Delta H^{M\to A} < 0 \quad \text{ve } \Delta S^{A\to M} = -\Delta S^{M\to A} < 0 \quad (10)$$

Eğer faz dönüşüm sırasında kalıcı deformasyon oluşmaz ise, martenzit fazına dönüşen östenitin tamamı tekrar östenit fazına geri dönebilir. Bu durumda;

$$\varepsilon_t^{A\to M} = -\varepsilon_T^{M\to A} \quad (11)$$

Faz dönüşümü sırasında, ileri dönüşüm sırasında depolanan elastik enerjinin tamamı geri dönüşümde tamamen salındığı kabul edilir. Bu durum şu şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta G_{el}{}^{A\to M}(f_m) = -\Delta G_{el}{}^{M\to A}(f_m) > 0 \quad (12)$$

Salınan enerji ΔG_{irr} değeri gerçek faz dönüşüm koşullarına ve malzemenin metalurjik yapısına bağlı olarak değişir. Genelde depolanan serbest enerjinin salınımı şeklinde tarif edilebilir ve ileri ve geri faz dönüşümleri için eşit kabul edilir.

$$\Delta G_{irr}{}^{A\to M}(f_m) = \Delta G_{irr}{}^{M\to A}(f_m) > 0 \quad (13)$$

Yukarıda sıralanan şartlar altında ve malzeme üzerine dışarıdan herhangi bir kuvvet uygulanmaması durumunda ileri ve geri faz dönüşümleri kritik sıcaklıklar aşağıdaki gibi yazılabilir.

$(\Delta G^{A\to M} = \Delta G^{M\to A} = 0)$

$$T^{A\to M}(f_m) = \frac{\Delta H^{A\to M} + \Delta G_{el}{}^{A\to M}(f_m) + \Delta G_{irr}{}^{A\to M}(f_m)}{\Delta S^{A\to M}} \quad (14)$$

$$T^{M\to A}(f_m) = \frac{\Delta H^{M\to A} + \Delta G_{el}{}^{M\to A}(f_m) + \Delta G_{irr}{}^{M\to A}(f_m)}{\Delta S^{M\to A}} \quad (15)$$

$f_m = 0$ ise;

$$M_s = \frac{\Delta H^{A\to M} + \Delta G_{el}{}^{A\to M}(0) + \Delta G_{irr}{}^{A\to M}(0)}{\Delta S^{A\to M}} \quad (16)$$

$$A_f = \frac{\Delta H^{M\to A} + \Delta G_{el}{}^{M\to A}(0) + \Delta G_{irr}{}^{M\to A}(0)}{\Delta S^{M\to A}} \quad (17)$$

$f_m = 1$ ise;

$$M_f = \frac{\Delta H^{A\to M} + \Delta G_{el}{}^{A\to M}(1) + \Delta G_{irr}{}^{A\to M}(1)}{\Delta S^{A\to M}} \quad (18)$$

$$A_s = \frac{\Delta H^{M\to A} + \Delta G_{el}{}^{M\to A}(1) + \Delta G_{irr}{}^{M\to A}(1)}{\Delta S^{M\to A}} \quad (19)$$

Bu denklemler, anlık elastik ve sürtünme enerjileri hesaba katılarak türetilmiş ve faz dönüşümleri için gerekli olan sıcaklık değerlerini göstermektedirler. Faz dönüşüm sıcaklıkları farklı etkilere (içyapı, iç gerilme, dış gerilme, çökelti vb.) bağlı olarak değişebilmektedir. Bu durumlarda yukarıdaki denklemlerin duruma göre uyarlanması gerekir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL YÖNTEM

4.1. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada kullanılan $Ni_{45.3}Ti_{29.7}Hf_{20}Pd_5$ (% at.) alaşımları ark ergitme yöntemi ile ingot şeklinde üretildi. Daha sonra üretilen ingotlar yüksek sıcaklıkta 1:7 oranında ekstrüze edildi. Alaşımlar üzerinde 650 °C' de 10 saat boyunca ısıl işlem uygulandı. Sonrasında su verme işlemi uygulanarak soğutuldu.

DSC testleri için malzemeler, ağırlıkları 20-40 mg (miligram) arasında ve temas yüzeyleri düz olarak düşük hızlı abrasif kesme cihazı ile kesildi.



Şekil 4.1. Düşük hızlı abrasif kesme cihazı [83]

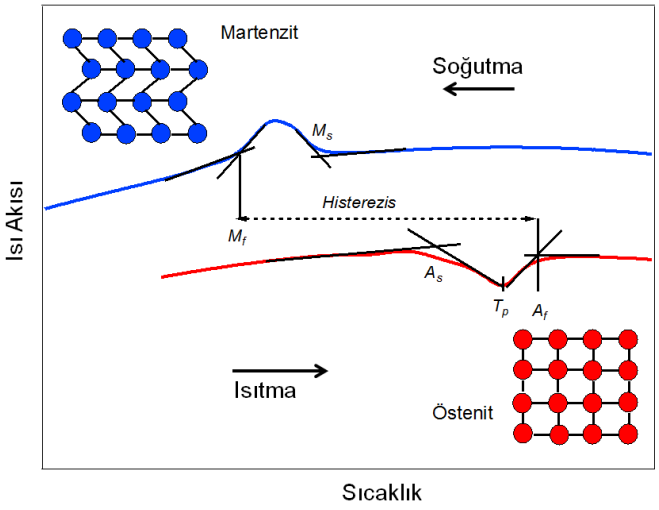
Daha sonra düz yüzeyleri taban ile temas edecek şekilde alüminyum kefeciklerde DSC cihazına yerleştirildi.

Faz dönüşüm sıcaklıkları Perkin-Elmer PYRIS 1 markalı DSC cihazı kullanılarak bulundu.



Şekil 4.2. Perkin-Elmer Pyris 1 DSC [23]

Isıl çevrimler 40 ˚C/dak, 60 ˚C/dak ve 80 ˚C/dak ısıtma-soğutma hızlarında 5 çevrim halinde yapıldı. Aktüatör uygulamalarında faz dönüşümünün yüksek frekanslı olması istendiğinden 40 ˚C/dak, 60 ˚C/dak ve 80 ˚C/dak gibi yüksek ısıtma-soğutma hızları kullanıldı ve genelde çalışmalarda kullanılan çevrim hızı olan 10 ˚C/dak kullanılmadı. Faz dönüşüm sıcaklıkları, elde edilen DSC ısı akısı-sıcaklık eğrilerinden kesişim yöntemi ile hesaplandı Bu yöntem şematik olarak Şekil 4.3' te görülmektedir.



Şekil 4.3. DSC eğrisi ve eğri üzerinde faz dönüşüm sıcaklıkları, histerezis değerleri ve dönüşen fazların temsili gösterimi [84]

Şekil 4.3' te gösterilen DSC eğrisinde yüksek sıcaklıktaki dönüşüm eğrisi, ısıtma sırasında martenzit fazından östenit fazına gerçekleşen endotermik faz dönüşümünü

gösterirken düşük sıcaklıktaki dönüşüm eğrisi ise soğutma sırasında östenit fazından martenzit fazına gerçekleşen ekzotermik faz dönüşümünü göstermektedir.

DSC eğrisinde soğutma sırasında martenzit başlama sıcaklığında (M_s) östenit fazı teorik olarak martenzit fazına dönüşmeye başlar ve faz dönüşümü M_f sıcaklığına kadar devam eder. Malzeme ısıtılırken, martenzit tekrar ana fazı olan östenit fazına östenit başlangıç (A_s) sıcaklığında dönüşmeye başlar ve bu katı faz dönüşümü östenit bitiş (A_f) sıcaklığında sona erer.

Termal histerezis değerleri şekilde gösterildiği gibi A_f-M_f olarak hesaplanmıştır. Bu sıcaklık aralığında tüm faz dönüşümleri bitmiş olmaktadır. Dönüşüm sırasındaki entalpi değerleri ise DSC eğrisinde oluşan tepe ya da çukurların alanları hesaplanarak bulunur.

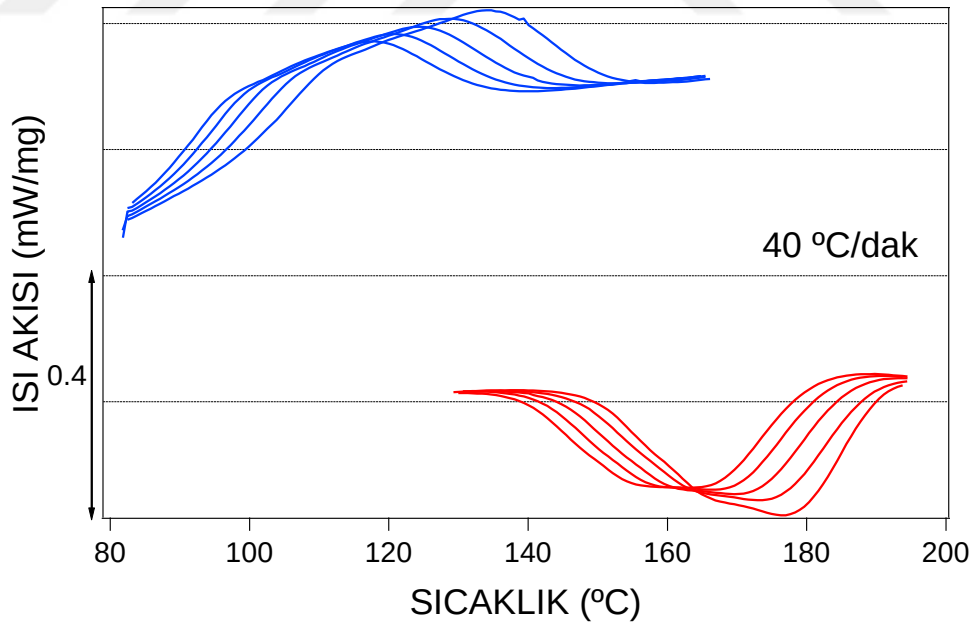
BÖLÜM 5

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Tartışma

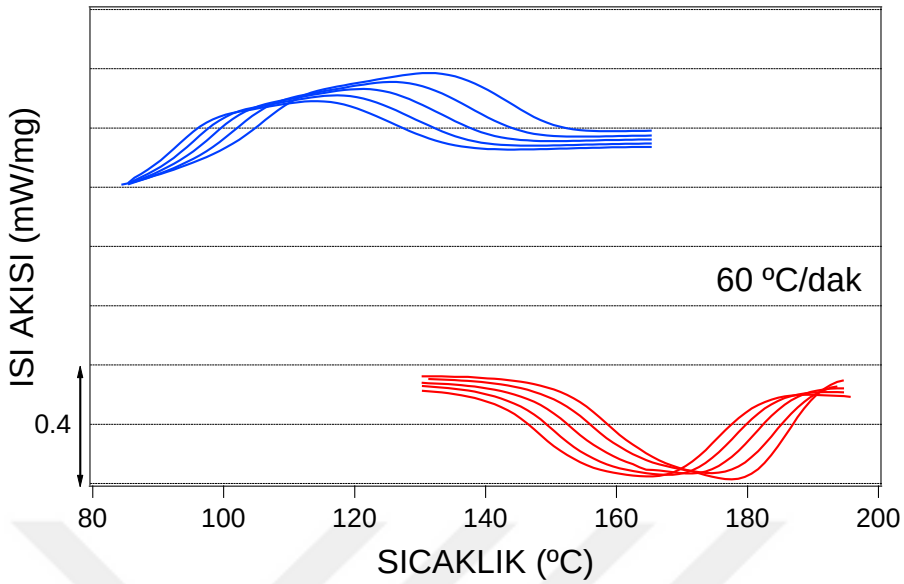
5.1.1. Faz Dönüşüm Sıcaklıkları

Şekil 5.1' de DSC yardımıyla 40 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları görülmektedir. İlk ısıl çevrimde ölçülen dönüşüm sıcaklıkları M_f, M_s, A_s ve A_f sırasıyla 98 ^{o}C, 153 ^{o}C, 149 ^{o}C ve 190 ^{o}C olarak ölçülmüştür. Daha sonra bu sıcaklıkların çevrim sayısının fonksiyonu olarak azaldığı belirlenmiştir.



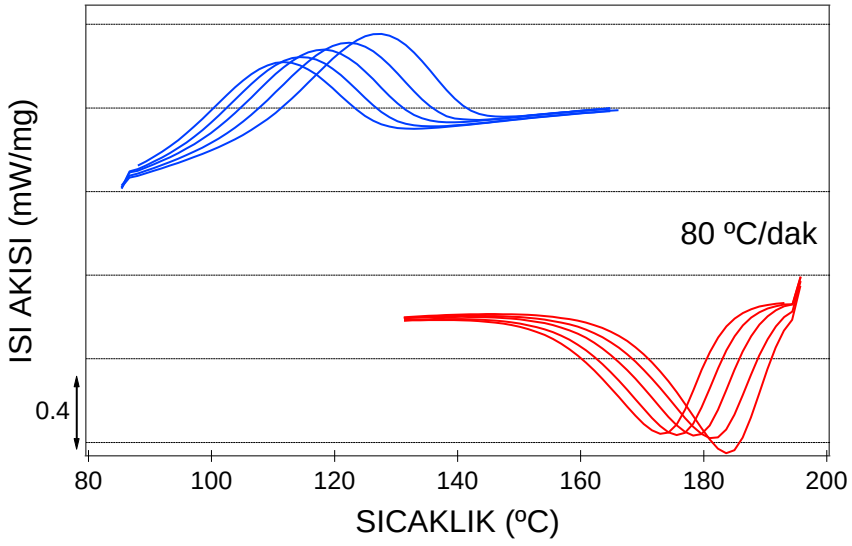
Şekil 5.1. DSC ile 40 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları

Şekil 5.2' de NiTiHfPd alaşımının 60 ^{o}C/dak ısıtma/soğutma hızı ile ölçülmüş DSC eğrilerini göstermektedir. Birinci çevrimde ölçülen dönüşüm sıcaklıkları M_f, M_s, A_s ve A_f için sırasıyla 99 ^{o}C, 150 ^{o}C, 149 ^{o}C ve 191 ^{o}C olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.2. DSC ile 60 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları

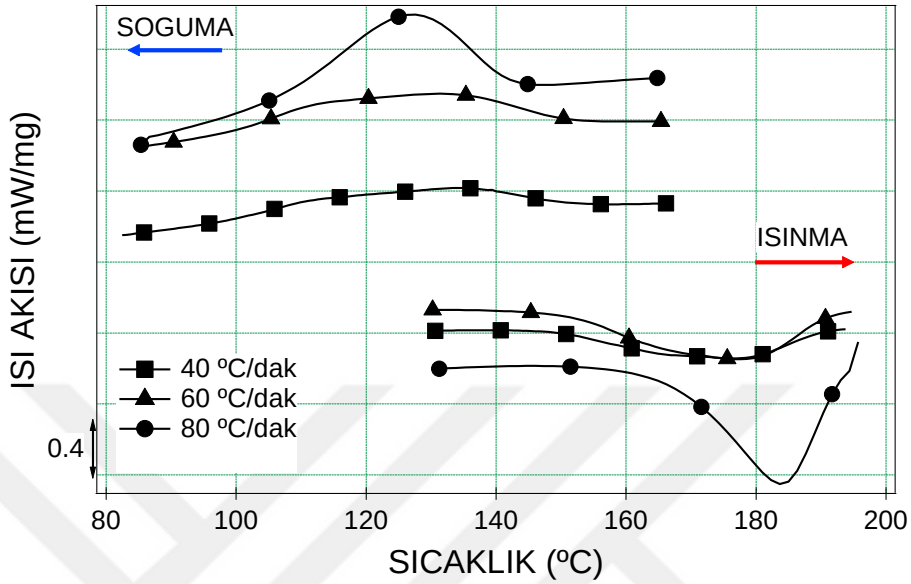
NiTiHfPd alaşımının 80 ^{o}C/dak ısıtma/soğutma hızı ile ölçülmüş DSC davranışları Şekil 5.3' te görülmektedir. Birinci çevrimde ölçülen dönüşüm sıcaklıkları M_f, M_s, A_s ve A_f için sırasıyla 104 ^{o}C, 142 ^{o}C, 166 ^{o}C ve 194 ^{o}C olarak hesaplanmıştır. Diğer ısıtma/soğutma hızlarına ait eğrilerde olduğu gibi dönüşüm sıcaklıklarının çevrim sayısı ile azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.3. DSC ile 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları

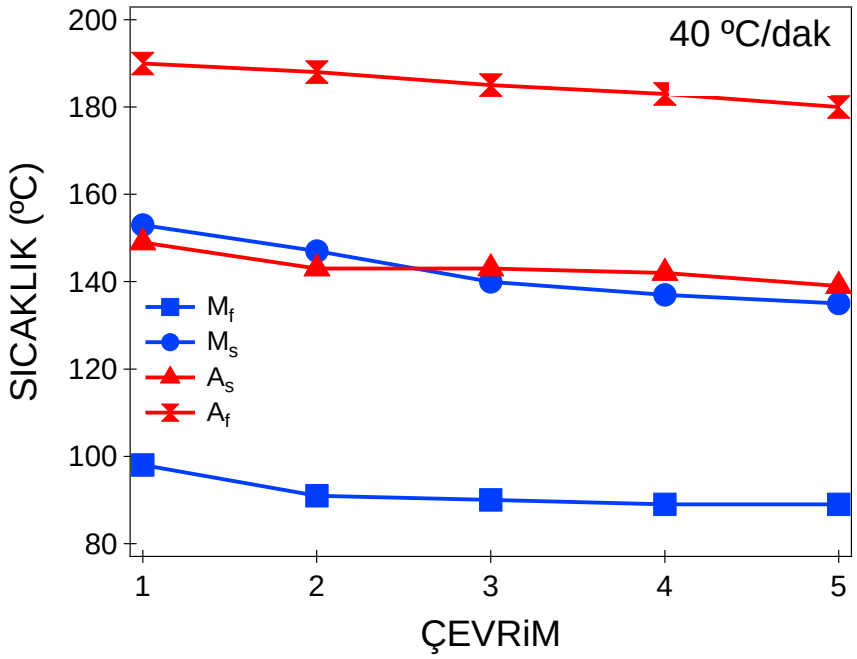
Şekil 5.4' te ilk ısıl çevrimde ölçülen martenzit başlangıç sıcaklığının soğutma hızına göre değişim grafiğini göstermektedir. Grafikten de anlaşılabileceği gibi dönüşüm sıcaklıklarının 3 farklı soğutma hızı için farklı olduğu görülmektedir. Örneğin, 40

^{o}C/dak soğutma hızı için M_s sıcaklığı birinci çevrimde 153 ^{o}C iken, bu değer 80 ^{o}C/dak soğutma hızı için 142 ^{o}C' ye düşmüştür.



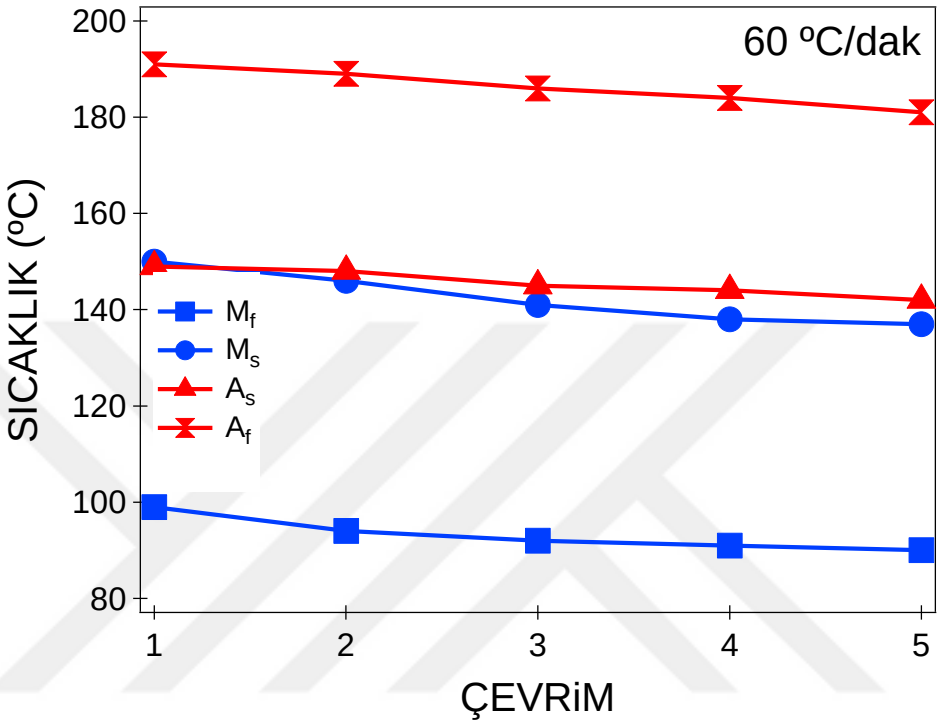
Şekil 5.4. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları (not: eğriler birinci ısıl çevrimlere aittir)

Şekil 5.5' te de faz dönüşüm sıcaklıklarının çevrim sayısına göre değişimi 40 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı için grafik halinde gösterilmiştir. Grafikten de açıkça anlaşılabildiği gibi çevrim sayısı ile birlikte dönüşüm sıcaklıkları azalma eğilimi göstermektedir.



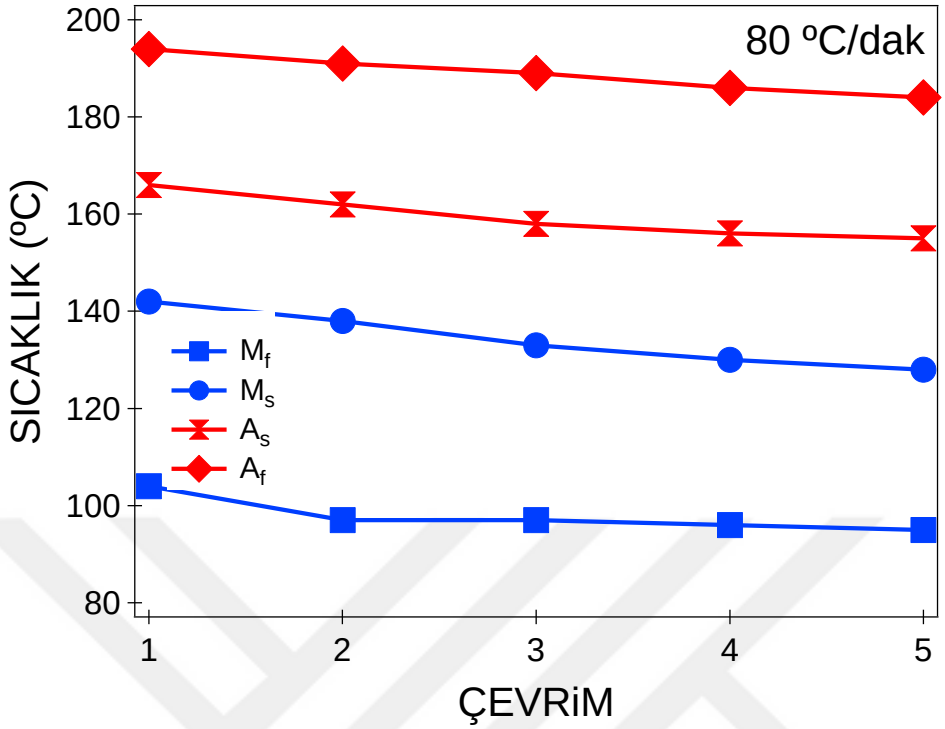
Şekil 5.5. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları

60 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı için ilk çevrimde ölçülen faz dönüşüm sıcaklıkları Şekil 5.6' da görülmektedir. İlk çevrimde ölçülen A_f sıcaklığı 191 ^{o}C iken bu değer beşinci çevrim de 181 ^{o}C ye düşmektedir.



Şekil 5.6. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları

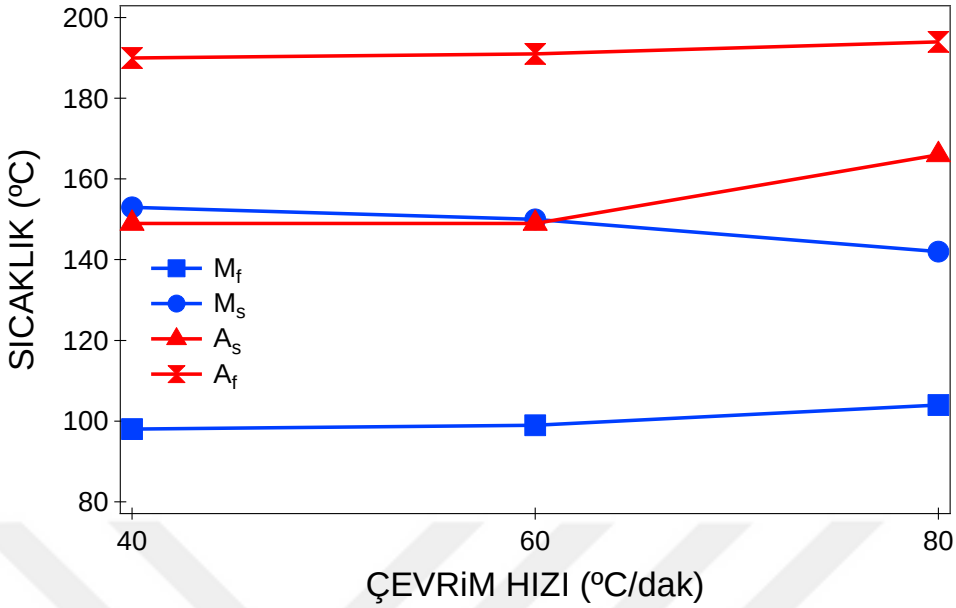
Şekil 5.7' de faz dönüşüm sıcaklıklarının çevrim sayısına göre değişimi 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı için grafik halinde gösterilmiştir. Diğer ısıtma-soğutma hızlarına ait grafiklerde de olduğu gibi çevrim sayısı ile birlikte dönüşüm sıcaklıkları azalmıştır.



Şekil 5.7. DSC ile 40 °C/dak, 60 °C/dak ve 80 °C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları

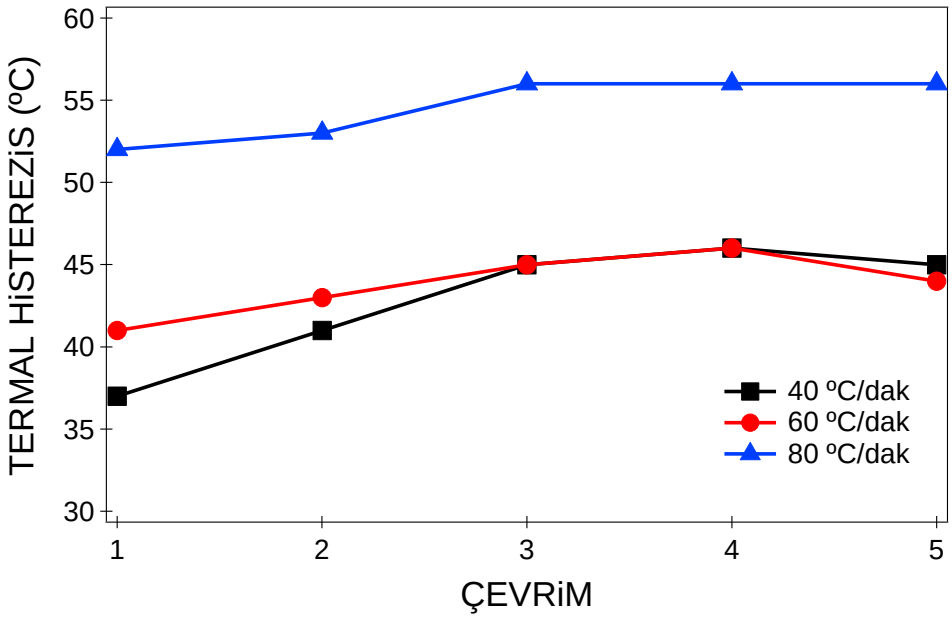
Dönüşüm sıcaklıklarındaki bu düşüş tekrarlı ısıl çevrimler ile malzeme içinde oluşan dislokasyonların sertleştirme etkisi ile açıklanabilir. Tekrarlanan ısıl çevrimler ile malzemelerin mikroyapısında dislokasyon yapıları oluşmuş ve bu yapılar martenzit dönüşümünü güçleştirmiş olabilir [85]. Bunun sonucunda da dönüşümü gerçekleştirmek için sisteme daha fazla enerji verilmeli ve bu enerji fazladan aşırı soğuma (ΔT) ile sağlanmalıdır. Bu davranış $M_s = T_o - \Delta T$ ile açıklanabilir. Bu denklemde T_o termodinamik denge sıcaklığını, ΔT de aşırı soğuma miktarını göstermektedir. Benzer şekilde dönüşüm sıcaklılarının ısıl çevrim ile düştüğünü gösteren birçok çalışma NiTi bazlı şekil hafızalı alaşımlar için literatürde mevcuttur [77,85]. Diğer taraftan Şekil 5.7' de martenzit dönüşüm sıcaklıklarının soğutma hızı arttıkça düştüğü görülmektedir. Buda martenzit fazının çekirdeklenmesinin soğuma hızının artması ile zorlaştığını ve fazladan aşırı soğuma gerektiğini göstermektedir.

Şekil 5.8' de faz dönüşümleri sırasında ilk ısıl çevrimlerden elde edilen dönüşüm sıcaklıklarının ısıtma-soğutma hızına bağlı olarak değişimini grafik halinde göstermektedir. Genel olarak ısıtma-soğutma hızı arttıkça faz dönüşüm sıcaklıklarının artış eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.8. DSC ile 40 °C/dak, 60 °C/dak ve 80 °C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları

Şekil 5.9' da ısıl histerezis değerlerinin farklı ısıtma/soğutma hızları ve çevrim sayıları ile değişimi görülmektedir. Çevrim sayısı ve ısıtma-soğutma hızı artışı ile histerezis değerlerinin genel olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 5.9. DSC ile 40 °C/dak, 60 °C/dak ve 80 °C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deneylerde termal histeresis ve çevrim sayıları

Bununla birlikte ısıtma/soğutma hızının artmasıyla özellikle ilk çevrimlerde histerezis miktarının artmış olduğu görülmektedir. Şekil hafızalı alaşımlarda histerezisin malzeme içinde meydana gelen iç sürtünmelerden oluştuğu bilinmektedir [20]. Şekil hafızalı alaşımlarda iç sürtünmeye neden olan mekanizmalar şu şekilde sıralanabilir [29].

i) Faz dönüşümü sırasında meydana gelen östenit-martenzit ara yüzeyindeki sürtünme,

ii) Martenzit tabakaları arasında meydana gelen sürtünme,

iii) Martenzit tabakaları içinde oluşabilecek iç ikizlenmelerden kaynaklanan sürtünme

iv) Faz dönüşümü sırasında oluşan ve büyüyen fazın çökelti vb. engeller ile arasında meydana gelebilecek sürtünme.

Yukarıdaki şekilde, 4. çevrimden sonra histerezis değerinin azaldığı ya da sabitleşme eğiliminde olduğu görülmektedir. Histerezis artışındaki azalmanın bir nedeni çevrim sayısının artması ile birlikte mikroyapıdaki dönüşmemiş martenzit miktarının artmış olması ve bu yapıların çevrim sayısı ile dönüşen malzeme miktarını azaltıyor olması olabilir. Buna benzer sonuçlar daha önce farklı alaşımlar içinde gösterilmiştir [29,86]. Diğer bir neden de çevrim sayısının artması ile mikroyapıda artmış olabilecek dislokasyon yoğunluğu olabilir. Dislokasyon yoğunluğu arttıkça malzemenin güçlenmesi ve davranışlarının daha kararlı hale gelmesi beklenmektedir. Kararlı hale gelinmesiyle içyapıdaki sürtünme miktarı azalacak ve böylece çevrim sonucunda oluşan histerezis miktarı da azalacaktır.

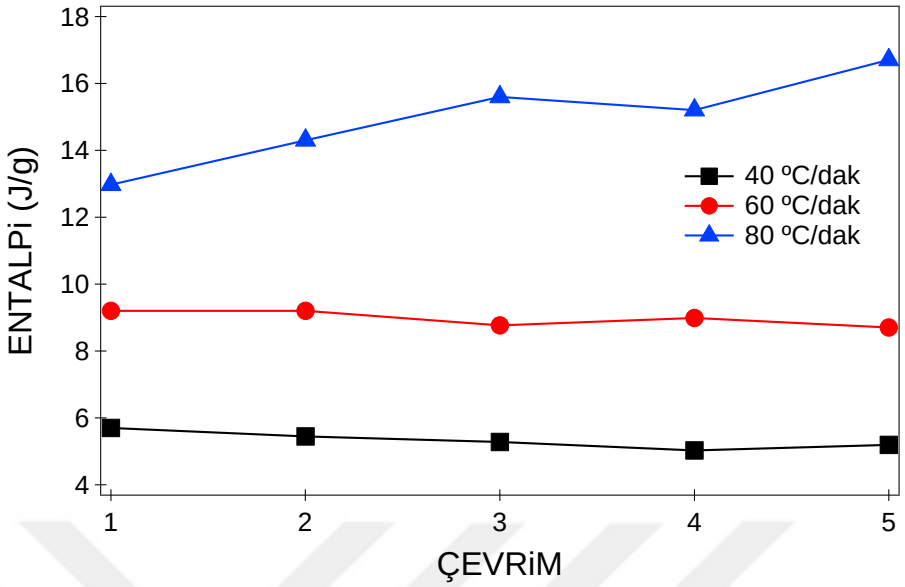
Şekil 5.9' da gösterilen sonuçlardan anlaşılabileceği gibi ısıtma-soğutma hızının artması ile malzeme içyapısındaki sürtünme ve bunun sonucunda enerji kaybı artmıştır. Soğutma hızına bağlı olarak görülen bu iç sürtünme değişimi $Q_{\max}^{-1} = K \frac{df}{dT} \frac{\dot{T}}{w}$ denklemi yardımıyla açıklanabilir [29]. Bu denklemde görülen K sabit, $\frac{df}{dT}$ sıcaklık değişimi ile martenzit değişimi, w birim şekil değişimi katkısı ve $\dot{T}$ ise ısıtma/soğutma hızını

göstermektedir. $\frac{df}{dT}$ ve w terimleri yalnızca kimyasal kompozisyona bağlı olduğundan dolayı bu çalışmada yapılan deneyler için ihmal edilebilir. Dolayısıyla bu denkleme göre $\dot{T}$ iç sürtünme miktarını belirlemede tek etken olmaktadır. Buna bağlı olarak yukarıdaki denkleme göre ısıtma soğutma hızı arttıkça malzemedeki iç sürtünme miktarı yani DSC eğrilerindeki histerezis miktarı da artmıştır. Isıtma/soğutma hızı ile malzemedeki iç sürtünmenin artması daha önce NiTiHfPd [29], Ni_2MnGa [87] ve $CuAl_{13}Ni_3$ (% ağ.) [88] gibi farklı alaşım sistemleri içinde rapor edilmiştir.

Şekil 5.9' da histerezis miktarının ilk çevrimlerde daha fazla düştüğü ve çevrim sayısı arttıkça artık çok fazla düşmediği ve kararlı hale gelme eğiliminde olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin çevrim sayısı ile malzeme içerisinde artan/yeniden düzenlenen dislokasyonlar olduğu düşünülmektedir. İlk çevrimlerde dislokasyon yoğunluğu artmış ve çevrim sayısı arttıkça daha önceden oluşan bu dislokasyonlar yeni dislokasyon oluşumunu engellemektedir. Yeni dislokasyon oluşumunun yavaşlaması da malzemedeki iç sürtünme miktarının artmasını yavaşlatmış olabilir.

Bununla birlikte, A_f sıcaklığı ile histerezis değerleri arasında direk bağıntı olduğu bilinmektedir. Şekil 5.7' de çevrim sayısına göre östenit bitiş sıcaklığı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Çevrim sayısı arttıkça A_f sıcaklığının düştüğü görülmektedir. Diğer taraftan ısıtma/soğutma hızı ile A_f sıcaklığı artmıştır. Bu değişiklikler termodinamik olarak A_f sıcaklığının artması ile sistemdeki kaybolan enerji miktarının arttığını göstermektedir. Kaybolan enerji miktarı ise DSC eğrilerinde histerezis olarak açığa çıktığına göre A_f sıcaklığının değişimi bize çevrimde gözlenen histerezis miktarı ile ilgili ipucu vermektedir.

Şekil 5.10' da martenzit fazının östenit fazına dönüşümü sırasında kaydedilen entalpi değerlerinin çevrim sayısı ve ısıtma-soğutma hızı ile değişimi görülmektedir. 40 ^oC/dak ve 60 ^oC/dak hızları için entalpi değerleri çevrim sayısı ile azalırken, 80 ^oC/dak ısıtma-soğutma hızı için çevrim sayısı ile entalpi değeri artmıştır. Bunun yanında ısıtma-soğutma hızı arttıkça entalpi değerleri de artmıştır.



Şekil 5.10. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları

5.1.2. Faz Dönüşüm Enerjileri

Şekil hafızalı alaşımlar, sahip oldukları şekil hafıza etkisi ve süperelastiklik gibi özgün özellikleri, termo-elastik martenzitik faz dönüşümleri sayesinde geçekleştirmektedirler. Termo-elastik faz dönüşümleri bilindiği gibi tersinir olan yani dönüşüm sırasında elde edilen deformasyonu geri kazandıran faz dönüşümleridir. Bu dönüşümlerde faz dönüşüm sıcaklıkları depo edilen ve salınan elastik enerji ve bunun yanında salınan sürtünme enerjisi gibi enerjilerden direk olarak etkilenmektedirler. Yani, tüm faz dönüşümü bahsedilen bu enerjilerin birbirlerine dönüşümünü içermektedir.

Faz dönüşümleri sırasında dönüşen üç temel enerji çekirdeklenme enerjisi, ilerleme enerjisi ve sürtünme enerjisi olarak sayılabilir. Çekirdeklenme enerjisi ΔG_{el}^{n} ile gösterilir ve martenzitin oluşması için gerekli olan enerjiyi ifade eder. İlerleme enerjisi ΔG_{el}^{p} ile gösterilir ve oluşan martenzit fazının ilerlemesi için gerekli olan elastik enerjiyi ifade eder. Sürtünme enerjisi ise ΔG_{irr} ile gösterilir ve faz dönüşümü sırasında sürtünmeden dolayı ısıya dönüşen ve tersinir olmayan enerji terimidir. Bu enerji değerleri aşağıdaki formüller ile hesaplanabilir.

$$\left|\Delta G_{el}^{n}\right| = (M_s - M_f)\left|\Delta S\right|$$

$$\left|\Delta G_{el}^{p}\right| = (T_o \Delta S) - (M_s + A_f)\frac{\left|\Delta S\right|}{2}$$

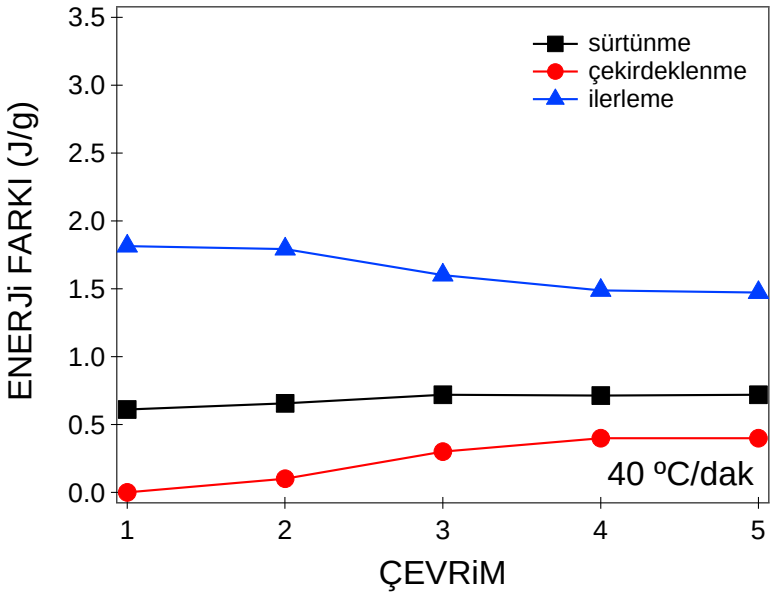
$$\Delta G_{irr} = \frac{A_f - M_s}{2}\left|\Delta S\right|$$

Termo-elastik martenzitik faz dönüşümü termodinamik olarak ifade edildiğinde denge sıcaklığı T_o çeşitli yöntemler ile hesaplanabilir. Ancak genelde $T_o = \frac{M_s + A_f}{2}$ [20] eşitliği ile ifade edilmektedir. Yapılan diğer çalışmalarda çökelti içermeyen mikroyapılarda bu değerin A_f sıcaklığına yakın olması gerektiği şeklindedir [20]. Bu çalışmada denge sıcaklığı yukarıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır. Faz dönüşümü sırasındaki entropi değişimi $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ formülü ile hesaplanabilir. Bu formülde ΔG serbest enerji değişimi, ΔH entalpi değişimi, ΔS entropi değişimi ve T sıcaklığı ifade etmektedir. Termodinamik denge $\Delta G = 0$ olduğu zaman sağlanabildiğine göre, denge durumunda formüldeki $T = T_o$ alınabilir. Bundan dolayı dönüşümün termodinamik parametreleri $\Delta S_{M \to A} = \frac{\Delta H_{M \to A}}{T_O}$ formülü ile ifade edilebilir [2]. Bu formüller yardımı ile hesaplanan termodinamik parametreler farklı DSC ısıl çevrim hızlarında alınan ilk çevrimler için aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 5.1. Isıtma/Soğutma hızına bağlı olarak dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametreler

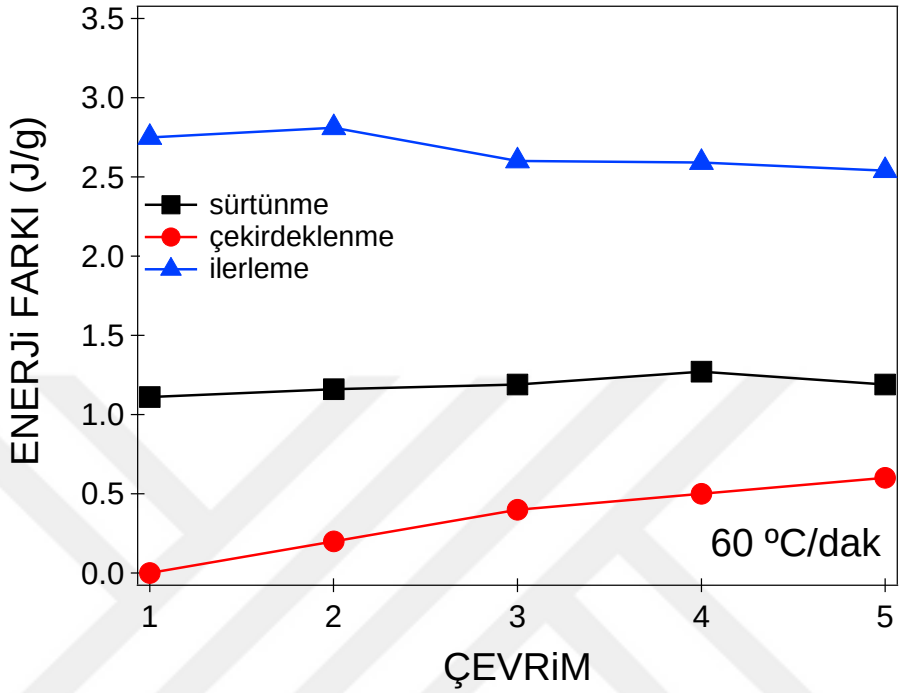
Isıtma/Soğutma hızı	M_f^{1st} (^oC)	M_s^{1st} (^oC)	A_s^{1st} (^{o}C)	A_f^{1st} (^{o}C)	$\Delta H_{A\to M}^{1st}$ (J/g)	$\Delta H_{M\to A}^{1st}$ (J/g)	$\Delta S_{A\to M}^{1st}$ (J/g ^{o}C)	$\Delta S_{M\to A}^{1st}$ (J/g ^{o}C)
40 ^{o}C/dak	98	153	149	190	8,58	5,7	0,05	0,033
60 ^{o}C/dak	99	150	149	191	10,3	9,2	0,06	0,054
80 ^{o}C/dak	104	142	166	194	17,98	12,97	0,107	0,077

Şekil 5.11' de faz dönüşüm enerjilerinin çevrim sayısına göre değişimi 40 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı için grafik halinde gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabildiği gibi çevrim sayısı ile ilerleme enerjisi azalmış, ancak sürtünme enerjisi çevrim sayısı ile artmıştır. Çekirdeklenme enerjisi ise ilk çevrim için 0 (sıfır) değerinde ve sonrasında çevrim sayısı ile artmıştır. Bu durum, martenzit çekirdeklenmesi için çevrim sayısı arttıkça daha fazla enerjinin gerektiği anlamına gelmektedir.



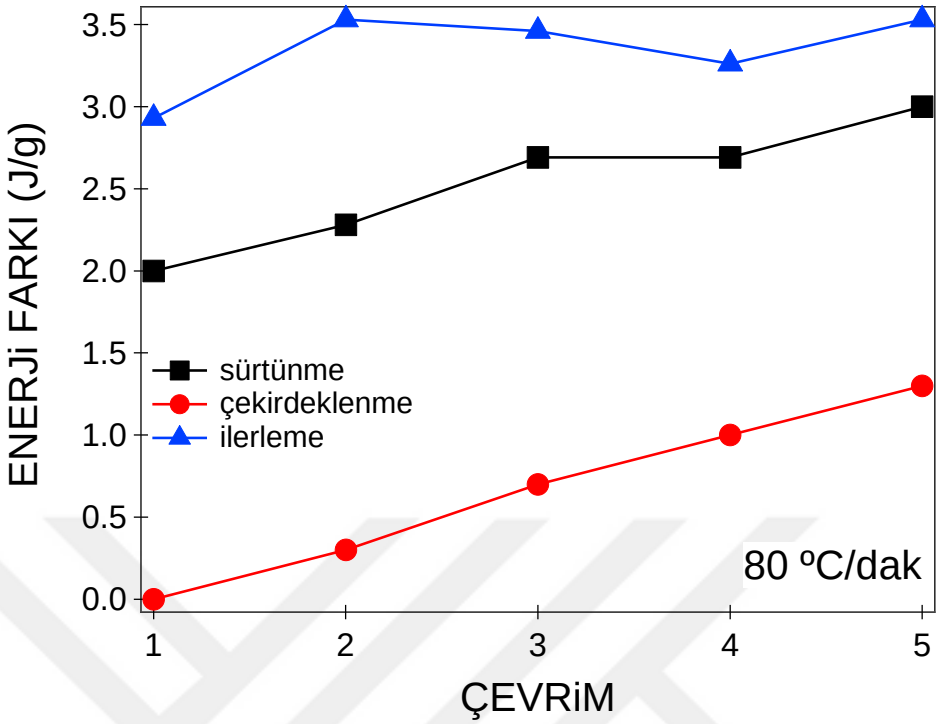
Şekil 5.11. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları (S: Sürtünme (irreversible), Ç: Çekirdeklenme (Nucleation), I: İlerleme (Propogation))

60 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı için yapılan ölçümlerden hesaplanan faz dönüşüm enerjileri şekil 5.12' de görülmektedir.



Şekil 5.12. DSC ile 40 ^{o}C/dak, 60 ^{o}C/dak ve 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçları

Şekil 5.13, faz dönüşüm enerjilerinin çevrim sayısı ile değişimini 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı için göstermektedir. Sürtünme enerjisinin çevrim sayısı ile arttığı ve ilerleme enerjisinin dalgalanma gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.13. DSC ile 80 ^{o}C/dak ısıtma-soğutma hızı ile yapılan deney sonuçlarından hesaplanan faz dönüşüm enerjilerinin çevrim sayısı ile değişimi

Aşağıdaki tabloda faz dönüşüm enerjilerinin ısıtma-soğutma hızına göre değişimi görülmektedir.

Tablo 5.2. Isıtma/Soğutma hızına bağlı olarak dönüşüm enerjileri (ikinci çevrim kullanılmıştır)

Isıtma/Soğutma hızı	ΔG_{el}^{n} (J/cm^3)	ΔG_{el}^{p} (J/cm^3)	ΔG_{irr} (J/cm^3)
40 ^{o}C/dak	0,1	1,792	0,656
60 ^{o}C/dak	0,2	2,81	1,16
80 ^{o}C/dak	0,3	3,53	2,28

Yukarıdaki şekillerden de anlaşılabileceği gibi çekirdeklenme enerjisi tüm ısıtma/soğutma hızları için ilk çevrimde sıfır bulunmuştur. Bunun nedeni ise denge sıcaklığını bulurken kullandığımız $T_o = \frac{M_s + A_f}{2}$ formülüdür. Diğer çevrimlerin enerjilerini bulurken kullandığımız T_o değeri ilk çevrimde kullanılan T_o değeridir ve bundan dolayı da bulunan enerji değerleri ilk çevrime göre hesaplanan relatif enerji değişim değerleridir.

Yine yukarıdaki şekillerden anlaşılabileceği gibi çevrim sayısı ile sürtünme enerjileri genel olarak artmıştır. Buda bize şekil hafızalı alaşımlarda enerji salınımının en önemli nedeninin sürtünme olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu sonuçları daha önce Şekil 5.9' da gösterilen termal histerezis-çevrim grafikleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte çevrim sayısı artışı ile çekirdeklenme enerjileri de artış göstermektedir. Bu gözlem bize çevrim sayısı arttıkça ilk oluşan martenzit fazının çekirdeklenmesinin güçleştiğini ve fazladan enerji gerektirdiğini gösterir. Bu bulgunun nedeninin ise daha önce dönüşüm sıcaklıklarının düşmesindeki neden ile aynı olduğu düşünülmektedir [20]. Çevrim sayısı ile mikroyapıda artış gösteren dislokasyonlar faz dönüşümü sırasında faz ara yüzünün hareketini zorlaştırmakta ve böylece çekirdeklenme enerjisi artmaktadır.

5.2. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada NiTiHf-bazlı alaşım sistemine % 5 oranında Pd elementinin eklenmesi ile elde edilen NiTiHfPd şekil hafızalı alaşımlarının faz dönüşüm özellikleri ve faz dönüşüm enerjileri termal çevrim sayısının ve ısıtma/soğutma hızlarının fonksiyonu olarak incelenmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda faz dönüşüm sıcaklıklarının ve termal histerezis değerlerinin ısıtma/soğutma hızları ve çevrim sayıları ile değiştiği gözlenmiştir. Tüm çevrim hızları için 80 ^oC' nin üzerinde dönüşüm sıcaklıklarının elde edildiği görülmüş ve bu özellik sayesinde NiTiHfPd alaşımlarının özellikle havacılık alanındaki sıcak bölge aktüatör uygulamaları için aday olabileceği anlaşılmıştır.

Deneysel çalışmalara ek olarak sürtünme, çekirdeklenme ve ilerleme gibi faz dönüşüm enerjilerinin termodinamik analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda

çekirdeklenme ve sürtünme enerjilerinin çevrim sayısı ile genel olarak arttığı gözlenmiştir. Diğer taraftan ilerleme enerjileri ise genel olarak çevrim sayısı ile azalmıştır.

Bundan sonraki çalışmalarda farklı kimyasal kompozisyonlara sahip NiTiHfPd alaşımlarının faz dönüşüm özellikleri incelenebilir. Eğer yapılan çalışmalar ile uygun bir kompozisyon bulunabilir ise ikinci aşama olan mekanik testlerin uygulanması önerilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Funakubo, H., Shape Memory Alloys, Taylor & Francis, 1987.

[2] Wayman, C.M., Otsuka, K., Shape Memory Materials, Cambridge University Press, 1998.

[3] Hodgson, D.E., Wu. M.H., Biermann, R.J., 2002. Shape Memory Alloys, Shape Memory Applications, Inc., **www.sma-inc.com**.

[4] Akdoğan, A., Nurveren, K., 2002. Akıllı Malzemeler ve Uygulamaları, **Machinery MakinaTek, 57**, p. 35, Ankara, Türkiye.

[5] Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M.A., 2014. "A of shape memory alloy research, applications and opportunities", **Materials and Design 56,** 2014 1078–1113 .

[6] Huang, W.: "Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures", Doktora Tezi, University of Cambridge , Peterhouse, (March 1998).

[7] Otsuka, K. and Ren, X., 1997. Recent developments in research of shape memory alloys, **Intermetallics 7,** 511-528.

[8] Ünlü, N., 2016. Demir Katkılı CuAlNi Şekil Hafızalı Alaşımların Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 108 s.

[9] Lagoudas, D.C., "Shape memory alloys: Modeling and engineering applications, Sprinder, 2008.

[10] Konuk, G., 2014. Şekil Hafızalı Alaşım ile Çok Amaçlı Aktüatör Tasarımı ve Uygulaması. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 71 s.

[11] Kaya, M., 2008. Toz metalürjisi ile Üretilen Şekil Hatırlamalı Alaşımların Metalürjik ve Mekanik Karakteristiklerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen

Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, 122 s.

[12] Kayalı, N., 1993. Cu-Zn-Al Alaşımlarında Martensit Stabilizasyonu ve Yaşlandırma Etkileri. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.

[13] Erdoğan, H.O., 2015. NiTi Şekil Bellekli Alaşımların Süperelastik Özelliklerinin Termo-Mekanik İşlemlerle Süperelastik Özelliklerinin Geliştirilmesi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 117 s.

[14] Porter, D.A., ve Easterling, K.E., 1991. "Phase Transformations In Metal And Alloys", 2nd ed., **Chapman& Hall, London,** p.1-3.

[15] Güney, İ., 2012. Martenzitik Faz Dönüşümleri İçin Mikromekanik Temelli Bir Model. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 89 s.

[16] Callister W. D., 2003. Materials Science and Engineering:An Introduction, John Wiley&Sons Inc., Hoboken NJ.

[17] Toptaş E., Akkuş N., 2007. Şekil Hafızalı Alaşımlar ve Endüstriyel Uygulamaları, **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi (4),** 15-22.

[18] Durlu, T.N., 1996. "Katıhal Fiziğine Giriş", Bilim Yayınları, Ankara.

[19] Ay, İ., "Plastik Şekil Vermede Metalurjik Esaslar", **http://w3.balikesir.edu.tr/~ay** (Erişim Tarihi: Ocak 2017).

[20] Wollants, P., Roos, J.R. and Delaey, L., 1993. "Thermally- and stress-induced thermoelastic martensitic transformations in the reference frame of equilibrium thermodynamics", **Prog. Mater. Sci, 37;** 227–288.

[21] Salzbrenner, R.J. and Cohen, M., 1979. "On the thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations", **Acta Metall, 27;** 739–748.

[22] Tong, H. and Wayman, C.M., 1975. "Thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations", **Acta Metall, 23;** 209–215.

[23] Acar, E., 2014. Precipitation, orientation and composition effects on the shape memory properties of high strength NiTiHfPd alloys, PhD Dissertation, University of Kentucky.

[24] Cui J. vd., 2006. "Combinatorial search of thermoelastic shape-memory alloys with extremely small hysteresis width", **Nature Materials, 5:**4 286–290.

[25] Acar E., Oktay T., 2018. "Havacılık ve uzay uygulamalarında şekil hafızalı alaşımlar", **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,7:**1,335-349.

[26] Kaya, Tobe, H., Karaca, H.E., Acar, E. and Chumlyakov, Y., 2016. "Shape Memory Behavior of [111]-Oriented NiTi Single Crystals After Stress-Assisted Aging" **Acta Metall. Sin. (English Lett), 29;** 282–286.

[27] Karaca, H.E., Acar, E., Basaran, B., Noebe, R.D., Bigelow, G., Garg, A.,Yang, F., Mills, M.J. and Chumlyakov, Y., 2012. "Effects of aging on [111] oriented NiTiHfPd single crystals under compression", **Scr. Mater, 67;**728–731.

[28] Acar, E., Karaca, H.E., Basaran, B., Yang,F., Mills, M.J., Noebe, R.D. and Chumlyakov, Y., 2013. "Role of aging time on the microstructure and shape memory properties of NiTiHfPd single crystals", **Mater. Sci. Eng. A,573;**161–165.

[29] Acar, E., 2015. "Dynamic mechanical response of a Ni45.7Ti29.3Hf20Pd5 alloy", **Mater. Sci. Eng. A., 633;**169–175.

[30] Acar, E., Tobe, H., Kaya, I., Karaca, H.E. and Chumlyakov, Y., 2015. "Compressive response of Ni45.3Ti34.7Hf15Pd5 and Ni45.3Ti29.7Hf20Pd5 shape-memory alloys", **J. Mater. Sci., 50;**1924–1934.

[31] Karaca, H.E., Acar, E., Tobe, H. and Saghaian, S.M., 2014. "NiTiHf-based shape memory alloys", **Mater. Sci. Technol., 30;**1530–1544.

[32] Karaca, H.E., Acar, E., Basaran, B., Noebe, R.D. and Chumlyakov, Y.I. 2012. "Superelastic response and damping capacity of ultrahigh-strength [111]-oriented NiTiHfPd single crystals," **Scr. Mater., 67;**5, 447–450.

[33] Stoeckel, D., 1990. Shape memory actuators for automotive applications. **Mater Des; 11:**302–7.

[34] Stöckel, D., 1995. The shape memory effect: phenomenon, alloys, applications. In:Shape memory alloys for power systems (**EPRI**);. p. 1–13.

[35] Liu, L.H., Yang H., Wang L.M. and Zheng Y.F., 2002. Recent Development of the SMA Industry in China, **Materials Science Forum, Vols 394-395,** pp. 293-296.

[36] Acar, E., Tobe, H., Karaca, H.E., Chumlyakov, Y., 2018. "On the stress-assisted aging in NiTiHfPd single crystal shape memory alloys" **Materials Science and Engineering A 725;**51-56.

[37] Ryhanen, J., 1999. Bicompatibility evaluation of nichel titanium shape memory metal alloy, PhD. Thesis, Oulu University Library.

[38] Schiller, E.H., 2002. Heat engine driven by shape memory alloys: Prototyping and Design, Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for a degree of Master of Science in Mechanical Engineering.

[39] Selimbeyoğlu, E., 1986. Shape Memory Effect in a CuAlNi, M.Sc.Thesis, Boğaziçi University, İstanbul.

[40] Shield, T.W., Leo, P.H., Grebner, W.C.C., 1997. "Quasi-static extension of shape memory wires under constant load", **Acta Materialia, vol. 45,** pp. 67-74.

[41] Nurveren, K., 2008. NiTi Alaşımında Şekil Hafıza Etkisinin İyileştirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 141 s.

[42] Miyazaki, S., Ishida, A, 1999. "Martensitic transformation and shape memory behavior in sputeer,deposited TiNi-base thin films", **Materials Science and Engineering A, vol. 273-275,** pp. 106-133.

[43] Scherngell, H., Kneissl, A.C., 1999. "Influence of the microstructure on the

stability of the intrinsic two-way shape memory effect", **Materials Science and Engineering A, vol. 273-275,** 400-403.

[44] Erbstoeszer, B., Armstrong, B., Taya, M., Inoue, K., 2000. "Stabilization of the shape memory effect in NiTi: An experimental investigation", **Scripta Materialia, vol. 42,** pp. 1145-1150.

[45] Şahin, F.Y., 2012. Tİtanyum-Nikel Alaşımlı Malzeme Üretimi Ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 93 s.

[46] Matsumoto, H., 2003. "Transformation behaviour with thermal cycling in NiTi alloys**", Journal of Alloys and Compounds, vol. 350,** pp. 213-217.

[47] Meng, X.L., Zheng, Y.F., Cai, W., Zhao, L.C., 2004. "Two-way memory effect of a TiNiHf high temperature shape memory alloy", **Journal of Alloys ans Compounds, vol. 372,** pp. 180- 186.

[48] Kurt, B., Orhan, N., 2002. "Şekil Hafızalı Alaşımların Kullanım Alanları Üzerine Son Gelişmeler" 9. Denizli Malzeme Sempozyumu PAÜ-Mühendislik Fakültesi Denizli, p 459-465.

[49] Kaya, M., Çakmak, Ö., Saygılı, T.Y., Atlı, K.C., 2016. Şekil hafızalı alaşımlarda martensitik faz dönüşümü ve şekil hafıza mekanizması. **Selçuk teknik-dergisi, 15** (3): 157-172.

[50] Ma, Y.Q., Jiang, C.B., Feng, G. and Xu, H.B., 2003. Thermal stability of the $Ni_{24}Mn_{25}Ga_{21}$ heusler alloy with high temperature transformation, **Scripta Materialia, 48:** 365-369.

[51] Kauffmann-Weiss, S., Kauffmann, A., Niemann, R., Freudenberger, J., Schultz, L., and Fahler, S., 2013. Twinning phenomena along and beyond the Bain Path, **Metals, 4:** 319-336.

[52] Çavdar, E., 2006. Şekil Hatırlamalı Ni-Ti Alaşımında Difüzyonsuz Faz Dönüşümünün Termodinamik Özellikleri. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 81 s.

[53] Dilibal, S., 2005. Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşım Üretimi ve Şekil Bellek Eğitimi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 115 s.

[54] Turner, L.T., 2001. Thermomechanical Response of Shape Memory Alloy Hybrid Composites, NASA, TM-2001-210656

[55] Uslu, S., 2013. Sıvı Ni-Ti Alaşımında Atomlar Arası Etkileşme Potansiyelleri. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne, 44 s.

[56] Uzun, H., Bayındır F., 2010. "Dental uygulamalarda titanyum ve özellikleri", **Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi, 20:2**:213-220.

[57] Otsuka, K., Ren, X., 2005. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys. Prog. **Mater. Sci. 54,** 50:511.

[58] Padula S, II, Qiu S, Gaydosh D, Noebe R, Bigelow G, Garg A, Vaidyanathan R. Effect of Upper-Cycle Temperature on the Load-Biased, Strain-Temperature Response of NiTi. **Metallurgical and Materials Transactions A 2012;43**:4610.

[59] Özcan, G., 2010. Şekil Hafızalı Alaşımların Farklı Sıcaklıklarda (5-300 °K) Magnetik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Malatya, 75 s.

[60] Ma, J., Karaman, I. and Noebe, R.D., "High temperature shape memory alloys", **International Materials Reviews, 55:5**, 257-315.

[61] Otsuka, K., Kakeshita, T., 2002. Science and Technology of Shape – Memory Alloys: New Developments, MRS Bulletin.

[62] Hodgson, D.E.: "Shape Memory Applications", Inc., Wu, M.H., Memory Technologies, and Biermann R.J., Harrison Alloys, Inc., (2002).

[63] Auricchio, F.: "Shape Memory Alloys:Applications and Finite-Element Modeling", Meccanica Strutturake, Universita delgi Studi di Pavia, Italy, (October 2002).

[64] Kusy, R.P., 1997. A Review of Contemporary Arch Wires: Their Properties and

Characteristics, **Angle Orthodontist, 67**, 197-208.

[65] **https://afghanheart.files.wordpress.com/2012/12/h9991269_0011.jpg** (Erişim Tarihi: Şubat 2017).

[66] Kartal, Ü., 2013. Nikel Titanyum Şekil Bellekli Alaşımların Üretiminin İncelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, 53 s.

[67] Sönmez, D., 2010. Şekil Hafızalı Metal Esaslı Malzemelerin Sürünme Özelliklerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 69 s.

[68] Kırbıyık, B.D., 2006. Nikel Titanyum Tellerin Recycling Sonrası Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinde Meydana Gelen Değişikliklerin İncelenmesi, İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ortodonti Anabilim Dalı, Doktora tezi, İstanbul.

[69] **http://www.yuzyildis.com.tr/index.php?sayfa=hizmetdetay&id=4** (Erişim Tarihi: Şubat 2018).

[70] **http://www.lemiulcay.com/?page_id=38** (Erişim Tarihi: Şubat 2018).

[71] Akdoğan, A., Nurveren, K., 2003. "Şekil Hafızalı Alaşımlar", **Mühendis ve Makine Dergisi,** Ankara, Haziran (2003).

[72] Bekker, A., Bribson, L.C. ve Issen, K., Localized and Diffuse Thermoinduced Phase Transformation in 1d Shape Memory Alloys, Journal of Intelligent **Material Systems and Structures, 9** (1988) 355-365.

[73] Ayırga, H.Y., 2014. Şekil Hafızalı Aktuator ile Biomekanik Hareket Edebilen Sualtı Robot Tasarımı ve Prototip Geliştirilmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 50 s.

[74] **http://uk.businessinsider.com/boeing-airplanes-winglets-nasa-2016-9** (Erişim Tarihi: Ocak 2018).

[75] **https://www.quora.com/Why-are-winglets-pointed-upwards** (Erişim Tarihi:

Şubat 2018).

[76] Acar, E., Ozbulut, O.E., Karaca, H.E., 2015. "Experimental investigation and modeling of the loading rate and temperature dependent superelastic response of a high performance shape-memory alloy" **Smart Materials and Structures 24** [7] ;075020.

[77] Ortín, J. and Planes, A., 1988. "Thermodynamic analysis of thermal measurements in thermoelastic martensitic transformations," **Acta Metall., 36**; 8, 1873–1889.

[78] Acar, E., Aydın, M., 2018. "Şekil hafıza davranışlarının termodinamiği", Politeknik Dergisi, (DOI: 10.2339/politeknik.386895.

[79] Liu, Y., 2009. "Thermodynamics of the shape memory effect in Ti–Ni alloys," in Shape memory Alloys for Biomedical Applications, T. Y. and S. Miyazaki, Ed. Woodhead Publishing.

[80] Mur, G., Javier,F., 1997. "Friction and stored elastic energy in Cu-Zn-A1 single crystals with pseudoelastic behaviour," **Thermochim. Acta, 290**;2,167–171.

[81] Nishida, M., Wayman, C.M. and Honma, T., 1986. "Precipitation processes in near-equiatomic TiNi shape memory alloys," **Metall. Trans. A, 17**;9, 1505–1515.

[82] Olson, G.B. and M. Cohen, M., 1975. "Thermoelastic behavior in martensitic transformations," **Scr. Metall., 9;**11,1247–1254.

[83] **http://www.alliedhightech.com/Equipment/techcut-4-low-speed-saw** (Erişim Tarihi: Ocak 2018).

[84] Acar, E., 2016. TiNi akıllı alaşımlarında faz dönüşümleri ve aktivasyon enerjilerinin belirlenmesi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri dergisi Part: C 4**(3):165-171.

[85] McCormick, P.G. and Liu, Y., 1994. "Thermodynamic analysis of the martensitic transformation in NiTi—II. Effect of transformation cycling," **Acta**

Metall. Mater., 42; 7,2407–2413.

[86] Karaca, H., Acar, E., Ded, G.S. vd., 2015. "Microstructure and transformation related behaviors of a $Ni_{45.3}Ti_{29.3}Hf_{20}Cu_5$ high temperature shape memory alloy" **Materials Science and Engineering A 627**;82-94.

[87] Segui, C., Cesari, E., Pons, J., Chernenko, V., 2004. " Internal friction behaviour of Ni–Mn–Ga" **Materials Science and Engineering A 370**; 481-484.

[88] San Juan, J., No ML 2003 "Damping behavior during martensitic transformation in shape memory alloys" **Journal of Alloys and Compounds, 355**;65-71.

ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı: Musa ÇALIŞKAN

Uyruğu: Türkiye

Doğum Tarihi ve Yeri: 19.05.1992 / Konya

Medeni Durumu: Bekâr

Tel: 0 505 792 60 91

email: musacaliskan742@gmail.com

Yazışma Adresi: Mareşal Çakmak Mah. Ortaç Cad. No: 37/7 Güngören/İSTANBUL

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü	2018
Lisans	EÜ Sivil Havacılık Yüksek Okulu	2015
Lise	Karatay Süleyman Demirel Milli Piyango Anadolu Lisesi	2010

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2015- Halen	THY Teknik A.Ş.	Hat Bakım Teknisyeni