

143001

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR
KULLANILARAK GELİŞTİRİLEN
İTÜ ROBOT EL PROTOTİPİ
VE PERFORMANS ANALİZLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Savaş DİLİBAL
(514011021)

- 143001 -

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Mayıs 2003

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. Adnan DİKİCİOĞLU

Jüri Üyesi

Prof.Dr.Turgut ÖZAKTAŞ

Jüri Üyesi

Doç.Dr. Murat VURAL

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Yirminci yüzyıl uygarlık tarihinde önemi olan buluşlardan büyük bir bölümünün yapıldığı dönemdir. Bu dönem buluşlarından biri de şekil bellekli alaşımlardır. 1930'larda bulunmasına rağmen şekil bellekli alaşımlar kısa sürede ileri teknolojinin birçok alanında yerini almıştır. İlk başlarda sadece metalürji mühendislerinin inceleme alanına girmekte iken, günümüzde uzay-uçak mühendisliğinden biyomedikal alana kadar birçok alanda yaygınlaşmaya ve bazı alanlarda ise diğer sistemlere tercih edilir hale gelmeye başlamıştır. Şekil bellekli alaşımların kullanımının yaygınlaştığı alanlardan bir tanesi de robotik sistemlerdir.

Gerçekleştirdiğim bu çalışmada değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım danışman hocam Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Şekil bellekli alaşımlar konusunda değerli çalışmaları bulunan ve çalışmamın ilerleyişi esnasında her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen Dr.R.Murat TABANLI'ya ve Emekli Y.Müh.Albay Erol SELİMBEYOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmamın TUBİTAK-MAM'da gerçekleştirdiğim DSC analizi safhasında yardımlarından dolayı Prof. Dr. Levon ÇAPAN'a, Dr. Tülay YILMAZ İNAN'a ve Uzman Teknisyen Zekayi KORLU'ya teşekkür ederim. Alglas firması sahibi Hilmi AL'a, Emek Tel Erozyon sahibi Cemal SARI ve Mak.Müh.Bora YILMAZ'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

İTÜ Metalurji Fakültesi laboratuvarlarında gerçekleştirdiğim SEM ve Mekanik Testler aşamasında yardımlarından dolayı Met.Müh. Barış ULUTAŞ ve Teknisyen Mızrap CANİBEYAZ'a teşekkür ederim. XRD testi aşamasındaki yardımlarından dolayı Doç.Dr. Erdem DEMİRKESEN ve Met.Müh. Ahmet ÇINAR'a teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın her aşamasında olduğu gibi Yüksek Lisans çalışmamda da en büyük desteği aldığım babam Emekli Öğretmen Hüseyin DİLİBAL'a ve yaşantımın her safhasında yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı	1
2. ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR VE ŞEKİL BELLEK ÖZELLİĞİ	4
2.1. Şekil Bellek Etkisi ve Martenzitik Faz Dönüşümü	4
2.2. Şekil Bellekli Alaşımların Süperelastik Özelliği	9
2.3. Martenzitik Dönüşümle İlgili Serbest Enerji Değişimi Teorisi	11
2.4. Şekil Bellek Özelliği Gösteren Alaşımlar	12
3. NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR VE KULLANIM ALANLARI	14
3.1. Ni-Ti Şekil Bellekli Alaşımların Genel Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	14
3.2. Ni-Ti Şekil Bellekli Alaşımların Kullanım Alanları	20
3.2.1. Ni-Ti Şekil Bellekli Alaşımların Endüstriyel Uygulamaları	20
3.2.2. Ni-Ti Şekil Bellekli Alaşımların Tıp Alanındaki Uygulamaları	24
4. ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA UÇ ETKİLEYİCİLER	26
4.1. Giriş	26
4.2. Kavrayıcılar	28
4.2.1. Tek yüzeyden kavrayıcılar	29
4.2.2. Çok yüzeyden kavrayıcılar	31
4.2.2.1 Çeneli tip kavrayıcılar	31
4.2.2.2 Parmaklı tip kavrayıcılar (Robot eller)	32
4.3. Geleneksel Robot Hareketlendirici Düzenekleri	36
4.4. Şekil Bellekli Alaşımların Robotik Uygulamaları	37
4.5. Şekil Bellekli Alaşım Hareketlendiriciler İçin Kontrol Sistemleri	42
5. İTÜ ROBOT ELİN TASARIMI VE KULLANILAN SİSTEMLER	44
5.1. İTÜ Robot Elin Tasarımı	44

5.2. İTÜ Robot Elde Kullanılan Sistem Ve Malzemeler	45
5.3. İTÜ Robot El Prototipinde Takip Edilen Çalışma Aşamaları	47
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE İTÜ ROBOT ELİN PERFORMANS ANALİZLERİ	50
6.1. Metalografik Analiz	50
6.2. NiTi Numunelerin Çekme Deneyi	51
6.3. İTÜ Robot Elin Performans Analizleri	53
6.3.1. Kullanılan güce göre NiTi parmakların kapanma süresi	53
6.3.2. İTÜ Robot Elde kullanılan NiTi parmakların açılma süresi	53
6.3.3. İTÜ Robot Elin kavrayabileceği en büyük ve en küçük parça boyutları	54
6.3.4. İTÜ Robot Elde kullanılan NiTi parmaklarla kaldırılacak en büyük parça ağırlığı	54
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58
EK A İTÜ Robot El ve Robot El İle Farklı Parçaları Kavrayıp Kaldırma	61
EK B İthal Edilen NiTi Şekil Bellekli Alaşımın DSC Analizi	62
EK C Ürettiğimiz NiTi Şekil Bellekli Alaşımın DSC Analizi	63
ÖZGEÇMİŞ	64

KISALTMALAR

Ms	: Martenzit başlangıç sıcaklığı
Mf	: Martenzit bitiş sıcaklığı
Md	: Gerilim esaslı martenzit başlangıç sıcaklığı
As	: Östenit başlangıç sıcaklığı
Af	: Östenit bitiş sıcaklığı
ŞBA	: Şekil bellekli alaşım
ŞBE	: Şekil bellek etkisi
TYD	: Tek yönlü şekil bellek davranışı
ÇYD	: Çift yönlü şekil bellek davranışı



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. : Bazı şekil bellekli alaşımların bileşim oranları, martenzitik dönüşüm sıcaklıkları ve histerisisleri	12
Tablo 3.1 : Nikel ve Bakır esaslı şekil bellekli alaşımların karşılaştırılması	14
Tablo 3.2 : NiTi ve 300 serisi paslanmaz çeliklerin özelliklerinin karşılaştırılması	15
Tablo 6.1 : NiTi numunelerden alınan EDS analizi sonucu elde edilen bileşimi	50
Tablo 6.2 : Parmak sayısına göre ve kullanılan güce göre NiTi parmakların kapanma süresi	53
Tablo 6.3 : İTÜ Robot Elde farklı soğutma sistemlerinde NiTi parmakların tam açılma süreleri	54

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : Martenzitik faz dönüşümünün iki boyutlu gösterimi	5
Şekil 2.2 : a) Kayma ile yerleşme, b) İkizlenme ile yerleşme	5
Şekil 2.3 : Şekil bellekli alaşımlarda martenzitik faz dönüşümü	6
Şekil 2.4 : Şekil bellek etkisi mekanizması	6
Şekil 2.5 : $M_s < T < A_s$ sıcaklığında gerilme – şekil değiştirme diyagramı ...	7
Şekil 2.6 : Şekil bellek alaşımlarda tek yönlü şekil bellek davranışı (TYD) .	7
Şekil 2.7 : Şekil bellekli alaşımlarda çift yönlü şekil bellek davranışı (ÇYD)	8
Şekil 2.8 : Şekil bellekli alaşım yayda ÇYD mekanizması	9
Şekil 2.9 : Şekil bellekli alaşımlarda superelastik özellik	10
Şekil 2.10 : Şekil bellekli alaşımlarda superelastik özellik gösteren bölge	10
Şekil 2.11 : Farklı sıcaklıklarda enerji yoğunluğu	11
Şekil 3.1 : Kübik (a) ve monoklinik (b,c) kafes yapıları	16
Şekil 3.2 : TiNi Faz Diyagramı	17
Şekil 3.3 : TiNi Faz Diyagramında atomca % 50 - %75 Nikel oranı arasında Ti_3Ni_4 oluşumu	18
Şekil 3.4 : Alaşımdaki ağırlıkça Nikel oranının değişimiyle oluşan A_s sıcaklığı eğrisi	18
Şekil 3.5 : Martenzit/ Östenit fazlarında alaşımın öz direnci-sıcaklık diyagramı	19
Şekil 3.6 : Hidrolik boru bağlama bileziği olarak nitinolun kullanılması	20
Şekil 3.7 : Ortam sıcaklığına göre açılıp kapanan sera pencere sistemi	21
Şekil 3.8 : Çıkış sıcaklığı ayarlanabilir akışkan sıvı valfi	21
Şekil 3.9 : NiTi ince film kullanılarak oluşturulan mikro valf	22
Şekil 3.10 : NiTi ince film kullanılarak düşük miktarlarda sıvı transferi yapılması	23
Şekil 3.11 : NiTi alaşımın süperelastik özelliği kullanılarak üretilen cep telefonu ve gözlük çerçevesi	23
Şekil 3.12 : Ortodontide kullanılan NiTi diş teli örnekleri ve uygulamaları....	24
Şekil 3.13 : Şekil bellekli alaşımların ortopedik kullanımı	24
Şekil 3.14 : Damar tıkanıklarında kullanılan NiTi stent örnekleri	25
Şekil 3.15 : Tıkanık olan damarın NiTi stentle açılması	25
Şekil 4.1 : Endüstriyel robot sisteminin temel birimleri	27
Şekil 4.2 : Nokta kaynak işlemi yapan iki endüstriyel robot	28
Şekil 4.3 : Vakumlu kavrama.....	29
Şekil 4.4 : Festo tarafından üretimi yapılan vakumlu kavrayıcıların bir uygulaması	30
Şekil 4.5 : Elektromanyetik kavrama ve bırakma	30
Şekil 4.6 : Çok yüzeyden kavrayıcılara örnekler.....	31
Şekil 4.7 : Çeneli tip kavrayıcı örnekleri	31
Şekil 4.8 : Festo tarafından üretimi yapılan çeneli tip kavrayıcılar	32

Şekil 4.9	: a. Esnektip robot el tasarımı b. Silindirik tip robot el tasarımı ...	33
Şekil 4.10	: Parmak yan yüzeylerinin kullanıldığı robot el tasarımı ve Standford/JPL Robot El	34
Şekil 4.11	: Standford/JPL Robot Elde makara –ip mekanizması	34
Şekil 4.12	: Makara-ip mekanizmasında hareket kontrolü	35
Şekil 4.13	: a. Karşılıklı parmaklardan oluşan tip robot el tasarımı b.Utah-MIT Robot Elin tasarımı	35
Şekil 4.14	: a. Şekil bellek alaşımı yay b. Şekil bellek alaşımı levha	38
Şekil 4.15	: NiTi alaşımların hareketlendirici olarak kullanıldığı mikro robot	38
Şekil 4.16	: Şekil bellekli alaşımların kullanıldığı mikro robotun hareketi ..	39
Şekil 4.17	: NiTi yayların kullanıldığı altı bacaklı robotik yengeç	39
Şekil 4.18	: NiTi yaylar kullanılan mikro tutucu	40
Şekil 4.19	: NiTi teller kullanılarak tasarlanan Squito robot böcek	40
Şekil 4.20	: NiTi teller kullanılarak geliştirilen Hitachi Robot El	41
Şekil 4.21	: Şekil bellekli alaşım kontrol değişkenleri	42
Şekil 5.1	: İTÜ Robot El tasarımı	44
Şekil 5.2	: SMA Robot El tasarımı	45
Şekil 5.3	: NiTi döküm ve levhalar	46
Şekil 5.4	: İTÜ Robot El ayasında kullanılan saydam akrilik levhalar	47
Şekil 5.5	: El ayası içerisindeki kanallar ve parmak bağlantılarının yerleştirilmesi	48
Şekil 5.6	: Robot el parmak bağlantı borularına delik delip kılavuz açma ..	48
Şekil 5.7	: NiTi parmaklara kazandırılan kavrama hareketleri	48
Şekil 5.8	: Robot elde parmak ucu ve parmak dibinde kullanılan malzemeler	49
Şekil 6.1	: NiTi numunelerden alınan EDS analizi	50
Şekil 6.2	: NiTi levhadan alınan numunenin mikro yapısı	51
Şekil 6.3	: NiTi levhadan alınan numunenin mikro yapısı	51
Şekil 6.4	: NiTi numunede $T > A_f$ için gerilme–şekil değiştirme diyagramı ..	52
Şekil 6.5	: NiTi numunede $T > A_f$ için gerilme–şekil değiştirme diyagramında süperelastik özelliğin görülmesi	53
Şekil 6.6	: Parmaklarda kavranabilen en büyük parça boyutları	54
Şekil 6.7	: Parmaklarda kullanılan NiTi levhalarla yapılan kaldırma deneyi	55

NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR KULLANILARAK GELİŞTİRİLEN İTÜ ROBOT EL VE PERFORMANS ANALİZLERİ

ÖZET

Şekil bellekli alaşımların teknolojik önemi, şekil bellek etkisi ve superelastik özellik göstermelerinden kaynaklanmaktadır. Bu özellikler sıcaklık ve gerilmeye bağlı olarak kristal yapının martenzit ve ostenit fazlarına dönüşümü ile oluşur.

Şekil bellekli alaşımlar üretim yöntemlerinin de gelişimi ile birlikte, özellikle son 20 yıl içerisinde önemli teknolojik malzemeler sınıfına dahil olmuşlardır. Artık elektronikte sensör sistemlerinden, tıpta damar tıkanıklığında kullanılan stentlere, otomotivde radyatör fanlarından, robotikte çok bacaklı mobil robot sistemlerine kadar değişik alanlarda şekil bellekli alaşımların kullanıldığını görmek mümkündür. Bu çalışmada Ni-Ti şekil bellekli alaşımların mikro yapı ve mekanik özellikleri ile ilgili deneysel etüdler yapılmış, argon gazı altında vakum indüksiyon fırınında NiTi alaşımı üretilmiştir. Üretilen NiTi şekil bellekli alaşım, patlayıcıların taşınması, toplanması ve imhası düşünülerek prototipi geliştirilen İTÜ Robot Elin bağlandığı kolda hareketlendirici olarak kullanılmıştır. İTÜ Robot Elin parmaklarında ise ABD.'den ithal edilen NiTi levhalardan yararlanılmıştır. Ayrıca robot elin uygulanan güce göre kavrama / bırakma zamanı ve parça kavrama boyutları ile ilgili performans analizleri yapılmıştır.

DEVELOPMENT OF NICKEL-TITANIUM SHAPE MEMORY ALLOYS ACTUATED ITU ROBOT HAND (ITUHAND) AND ITS PERFORMANCE ANALYSIS

SUMMARY

The technological importance of shape memory alloys is coming from their shape memory effect (SME) and superelastic (SE) capability. SME and SE capability are related to temperature variation and applied stress which effect the crystal structure by martensitic and austenitic phase transformation.

Shape memory alloys (SMA) classified as a technological material for 20 years by its fabrication development. They are used now from sensor systems to medical artery calcification stent , from automotive radiator to robotic multi-legged robot system. In this study, NiTi shape memory alloy internal structure and mechanical properties are examined. NiTi SMA is produced in vacuum induction furnace under argon gas atmosphere. Produced NiTi is used as an actuator in the attached arm of ITUHand that has been developed to carry, remove and destroy explosives. In ITUHand's fingers NiTi sheet that had been imported from USA was used. Furthermore, a set of experiments were performed regarding gripping / releasing time according to applied powers and gripped object dimension.

1.GİRİŞ

İlk olarak 1932’de Au-Cd da gözlemlenmiş olan şekil bellek etkisi, 1960 ve 1970’lerde Nikel ve Bakır esaslı şekil bellekli alaşımların keşfine kadar fazla uygulama alanı bulamamıştır. Üretim yöntemlerinin de gelişimi ile birlikte şekil bellekli alaşımlar, özellikle son 20 yıl içerisinde önemli teknolojik malzemeler sınıfına dahil olmuşlardır.

Bu alaşımların teknolojik olarak öneminin bulunması, şekil bellek etkisi (ŞBE) göstermelerinden kaynaklanmaktadır. ŞBE kısaca şekil bellekli alaşımların maruz kaldıkları yüksek miktarda kalıcı şekil değişimlerinin, malzemenin belirli bir sıcaklığa ısıtılarak geri kazanılmasından ibarettir. Bu özellik, Şekil bellekli alaşımların tıp sahasında (diş telleri, damar tıkanıklıklarının ameliyatsız tedavisinde kullanılan stentler, ortopedik kullanımlar), hareketlendirici teknolojisi, sönümleme elemanı, gözlük çerçeveleri, elektrik bağlantıları ve mekanik kavramalar gibi çok geniş bir alanda uygulama bulmasını sağlamıştır.

Şekil bellekli alaşımlar (ŞBA), 1980’lerde yangın alarmları gibi çok farklı sahalarda kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel bimetal termostatlardan daha güvenilir ve uzun ömürlü olduğundan; merkezi ısıtma sistemlerinde, seralarda da kullanılmaya başlanmıştır. Şekil bellekli alaşımların şekil değiştirme anındaki yüksek güçleri Japon Şekil Bellekli Alaşımlar Birliği tarafından kayaların parçalanmasında kullanılmasını, alaşımın hafifliği ise NASA’nın uzay araştırmalarında ağır makinelerin yerine şekil bellekli alaşımları tercih etmesini sağlamıştır. 1994 yılında Mars gezegenine gönderilen Pathfinder/Sojourner mobil robotu üzerinde şekil bellekli alaşımlar kullanılmıştır. Alaşımın buradaki görevi mobil robotta bulunan güneş ışığına duyarlı bir hücreciğin (solar cell) üzerindeki cam kapağı harekete geçirip açmak olmuştur. Bu sayede bilim adamları küçük bir karşılaştırma yaparak mobil robotun hareketiyle cam üzerine biriken toz miktarını tespit edip gelecekteki Mars yolculuklarında ihtiyaç duyulacak güneş enerjisi panellerinin en etkin kullanımı ve temizlenmesinin nasıl olacağı hakkında bir fikir elde etmeyi amaçlamışlardır.

Şekil bellekli alaşımlar arasında NiTi alaşımının birçok alanda ticari kullanımının olması, alaşımın genel özelliklerinin sağladığı avantajlardan kaynaklanmaktadır. Bu özellikler; termomekanik çalışma mekanizmasının basitliği, yüksek güç/ağırlık oranına sahip olması, gürültüsüz, sessiz bir şekilde çalışması, korozyona karşı yüksek dayanıklılık göstermesi, temiz ve çevreyi kirletmeden çalışması, elektrik akımıyla kontrol edilebilme kolaylığı olarak sıralanabilir. Bütün bu özellikleri sağlayan şekil bellekli alaşımların robotik teknolojisinde kullanımı her geçen gün artmaktadır.

Robotik sistemler önceleri sadece insan yaşamı için tehlike oluşturan yerlerde kullanılırken, artık günümüzde endüstriyel alanda özellikle imalat otomasyonunda, boyama, ark ve nokta kaynağı, cilalama, taşlama, parça yükleme, delme, montaj gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Örneğin Ford firmasında nokta kaynaklarının % 98'inden fazlası endüstriyel robotlar tarafından yapılmaktadır [1].

Bir insan operatörün verimli, yüksek tempoda çalışabilmesi için parmaklarının hareket yeteneği ne kadar önemli ise, endüstriyel bir robot sisteminde de robot-el ve parmakların hareket yeteneğinin önemi o derece yüksektir. Robot-el ne kadar hünerli çalışırsa, üründeki hassasiyet ve verim oranı o oranda yüksek olacaktır.

Yapılacak görevle etkileşim halinde olan robotun en uç birimi robot uç etkileyicilerinin tasarımında da, endüstriyel robotun gelişmesine paralel olarak büyük gelişmeler olmuştur. Her işlem için işleme uygun robot uç etkileyiciler geliştirilmesinin yanında, genel maksatlı olarak kullanılabilecek endüstriyel robot uç etkileyicilerin geliştirilmesi, bilgisayarla bütünleşik üretim teknolojisine (CIM) daha büyük oranda esneklik sağlamıştır. Bu alanda değişik özelliklere sahip çok farklı uç etkileyici tasarımları geliştirilmiştir . Bu tasarımlardan biri de uç etkileyicisi olarak robot el kullanımı tasarımlarıdır.

Robot el için gerekli hareketlendirici düzeneğinin karmaşık olmayan, kontrolü kolay sağlanabilen, esnek bir sistemden oluşması işletmelerde endüstriyel robotların daha geniş bir alanda kullanılmasını sağlayacaktır. Bu sağlandığı takdirde endüstriyel robotun diğer kısımları üzerinde robot uç etkileyicisinin uygun kavrama yapabilmesi için gerekli karmaşık hareketleri yapma gereği azalacak böylece bu alanda oluşan büyük sorunlar aşılmış olacaktır.

Kullanımı devam eden robot ellerin birçoğunda, geleneksel hareketlendirici sistemleri olarak görülen; elektrik, hidrolik ve pnömatik hareketlendirici sistemlerinden yararlanılmaktadır. Bunların dışında şekil bellekli alaşımları da hareketlendirici teknolojilerine dahil etmek mümkündür. Şekil bellekli alaşımlar, belli kritik sıcaklık derecelerinde daha önceden kazandırılmış konumlarına geçerek malzemeye bir hareket kazandırır. Önemli olan konu bu hareketi robot el üzerinde kullanarak bunu kavrama özelliğine dönüştürmektir.

Tezde, giriş bölümünden sonra ikinci bölümde şekil bellekli alaşımlarla ilgili literatür araştırmalarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde NiTi Şekil bellekli alaşımlar ve kullanım alanları, dördüncü bölümde, endüstriyel robotlar, robotik kavrayıcı sistemler ve bunların kontrol sistemleri açıklanmış, şekil bellekli alaşımların robotikte kullanılması hakkında ayrıntılı açıklama yapılmıştır. Beşinci bölümde Nikel-Titanyum alaşımı kullanılarak tasarlanan İTÜ Robot Elin tasarım aşamaları, tasarımda kullanılan malzemeler, ve robot elin çalışma sistemi detaylı olarak açıklanmıştır. Altıncı bölümde deneysel çalışmalar ve İTÜ Robot Elin performans analizlerine yer verilmiştir. Son bölümde ise, ortaya çıkan sonuçlar ve gelecekte olabilecek çalışmalarla ilgili görüşler belirtilmiştir.

2. ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR VE ŞEKİL BELLEK ÖZELLİĞİ

Şekil bellekli alaşımlar, uygulanan sıcaklık ve gerilmelere bağlı olarak daha önceki şekil veya boyutuna geri dönebilme özelliği gösteren bir grup metalik malzemedir. Şekil bellek etkisi (ŞBE) ve superelastik etki (SE), şekil bellekli alaşımların en önemli iki termomekanik özelliğidir.

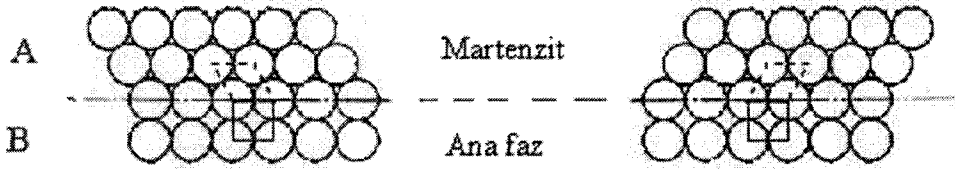
Şekil bellekli alaşımların temel karakteristiği, kritik bir dönüşüm sıcaklığının üzerinde ve altında farklı iki şekil ve kristal yapısına sahip olabilmeleridir. Bu kritik sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda östenitik yapı (ana faz), altındaki sıcaklıklarda ise martenzitik yapı elde edilir. Alaşım martenzitik yapıda iken deformasyona uğradıktan sonra dönüşüm sıcaklığı üzerine ısıtıldığında ana faza dönüşürken ilk şekline geri döner. Şekil bellekli alaşımların bu özelliğine şekil bellek etkisi denir. Şekil bellek etkisi tek yönlü şekil bellek davranışı (TYD) ve çift yönlü şekil bellek davranışı (ÇYD) olmak üzere iki çeşittir. ŞBA'ların sahip oldukları bu sıradışı şekil değiştirme özelliğini anlayabilmek için öncelikle ŞBE'nin yani termoelastik martenzitik faz dönüşümlerinin anlaşılması gereklidir.

2.1 Şekil Bellek Etkisi ve Martenzitik Faz Dönüşümü

Martenzitik faz dönüşümü, difüzyonsuz bir katı hal faz dönüşümüdür. Bu dönüşüm termoelastik ve termoelastik olmayan martenzitik dönüşüm olmak üzere iki gruba ayrılabilir [2]. Termoelastik martenzitik dönüşüm hareketli ikiz arayüzeylerinden oluşan ve kristalografik olarak geri dönüşüm gösterebilen bir mekanizmadır.

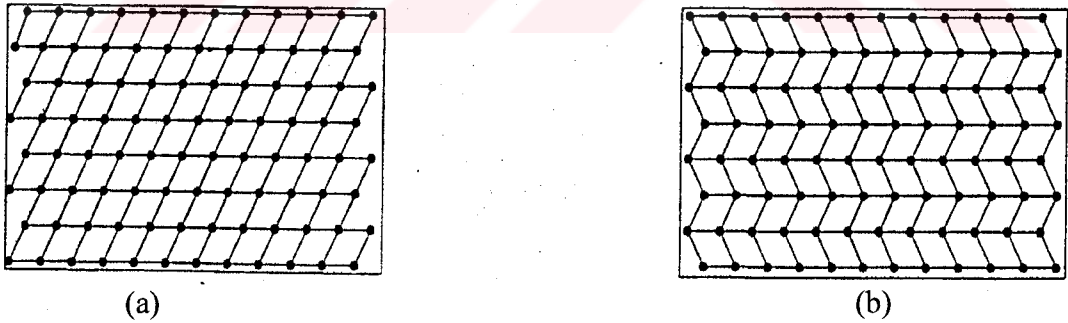
Şekil bellekli alaşımlarda martenzitik dönüşümün termoelastik olması; alaşımda sıcaklığın düşmesi ile martenzit plakaların oluşması ve büyümesi, sıcaklığın artması ile ise büyüme yönünün tam tersi yönde kaybolması olarak açıklanabilir. Bu alaşımlarda yüksek sıcaklıkta kararlı olan östenit fazı ve düşük sıcaklıkta kararlı olan farklı bir kristal yapısına sahip martenzit fazı bulunmaktadır. Ana faz (östenit fazı) çoğunlukla kübiktir ve martenzit faz düşük simetri içerir.

Şekil bellekli alaşımlarda sıcaklık kritik bir değerin altına düştüğünde, martenzitik dönüşüm kayma benzeri bir mekanizma ile başlar. Martenzitik yapı düşük simetri içerdiğinden, dönüşüm farklı kristalografik oryantasyonlarda ortaya çıkar. Bu yapıların her biri martenzitik yapının varyantları olarak isimlendirilir.



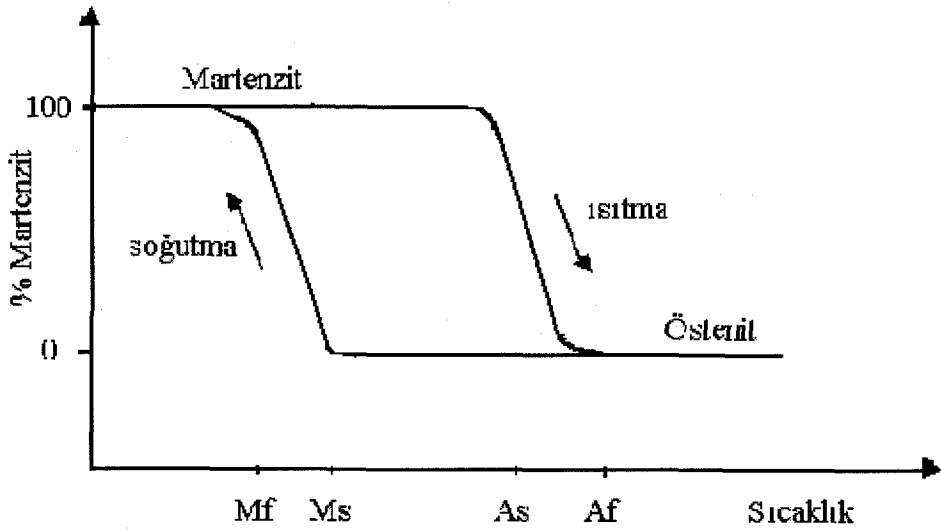
Şekil 2.1 Martenzitik faz dönüşümünün iki boyutlu gösterimi

Martenzitik faz dönüşümü çelikler gibi diğer bazı alaşımlarda da elde edilmesine rağmen, dönüşüm karakteristiği şekil bellekli alaşımlarda görülen mekanizmadan farklıdır. Termoelastik davranış göstermeyen bu dönüşüm çeliklerde genellikle yüzey sertleştirme işlemlerinde kullanılır. Kayma mekanizması ile birlikte oluşan bu martenzitik yapının önceki haline geri dönüşümü olanaksızdır (Şekil 2.2a). Fakat Şekil 2.2b’de ikizlenme ile oluşan ve termoelastik martenzitik dönüşüm gösteren yapının önceki haline dönüşümü mümkündür.



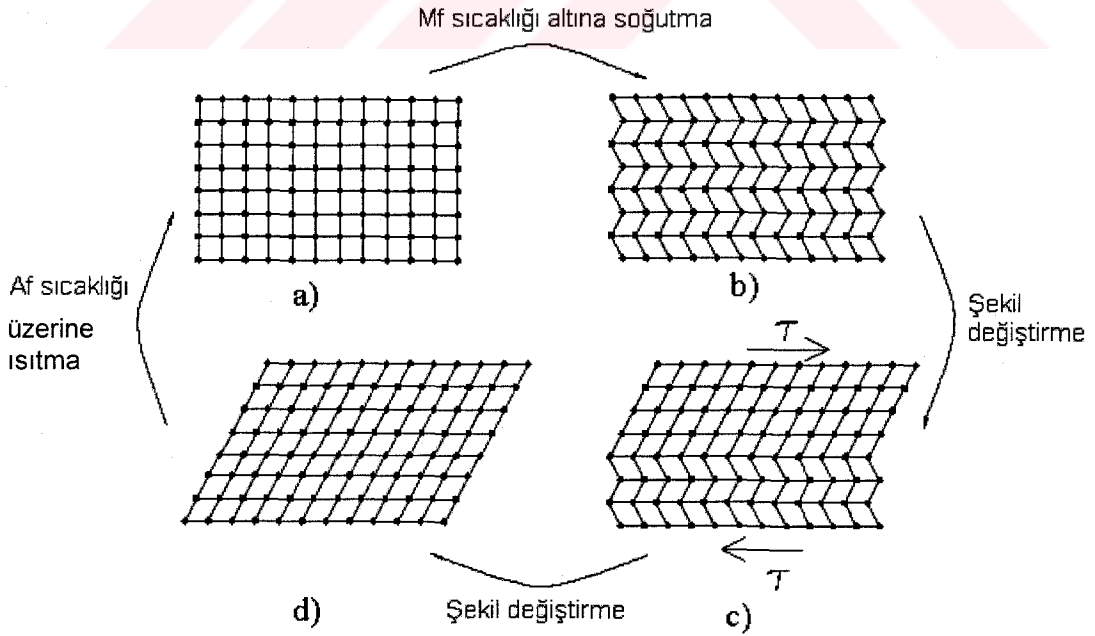
Şekil 2.2 a) Kayma ile yerleşme, b) İkizlenme ile yerleşme

Faz dönüşümünün oluşturduğu çevrim olan martenzit fazdan ana faza geçiş ve ana fazdan martenzitik faza geçiş bir histerisis gösterecek şekilde farklı sıcaklıklarda oluşur. Her alaşımın gösterdiği histerisis farklıdır. Bu histerisis üzerinde sıcaklığın düşmesi ile martenzitik yapının başlangıcı; M_s , tamamen martenzitik dönüşümün gerçekleşmesi; M_f , sıcaklık artırıldığında ise östenitik yapının başlangıcı; A_s ve tamamen östenitik yapının elde edilmesi A_f ile gösterilmektedir.



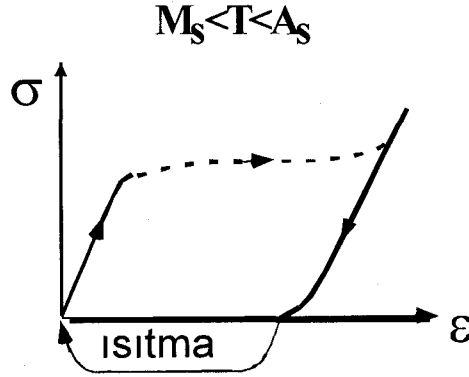
Şekil 2.3 Şekil bellekli alaşımlarda martenzitik faz dönüşümü

Martenzitik faz dönüşümü ile açıklanan şekil bellek etkisi mekanizmasını iki boyutlu olarak da inceleyebiliriz Şekil 2.4a'da östenit fazdaki alaşım soğutulduğunda, dış şekli değişmeden iç yapısı martenzite (Şekil 2.4b) dönüşür. Bu sıcaklıkta malzemeye kalıcı şekil değişimi verilir (Şekil 2.4c). Malzemenin ısıtılarak ostenite dönüşebilmesi (Şekil 2.4d), malzemenin ancak ilk ostenitik yapıdaki şekline geri dönmesi ile mümkün olur. Bu termomekanik değişim ŞBE olarak isimlendirilir.



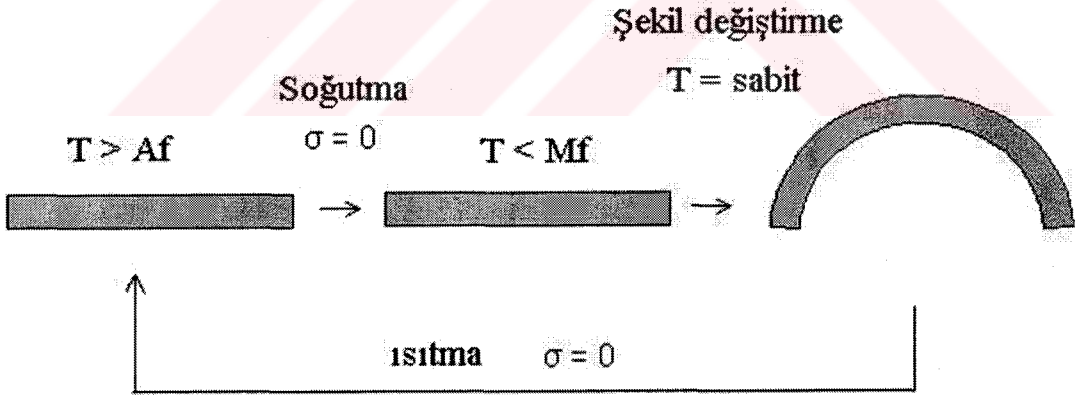
Şekil 2.4 Şekil bellek etkisi mekanizması

Bu mekanizma gerilme–şekil değiştirme diyagramı üzerinde Şekil 2.5’deki gibi gösterilebilir. Öncelikle martenzit fazda bulunan alaşım plastik deformasyona maruz bırakılır. Daha sonra östenit sıcaklığı üzerine çıkılarak östenitik yapı elde edildiğinde, alaşım elastik şekil değiştirmeye uğramış gibi tekrar ilk şekline geri döner.



Şekil 2.5 $M_s < T < A_s$ sıcaklığında gerilme – şekil değiştirme diyagramı

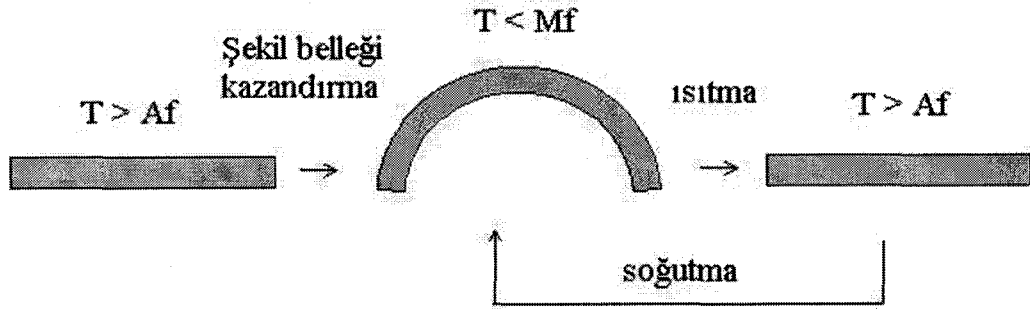
Şimdiye kadar açıklanan kısımda şekil bellekli alaşımların Tek Yönlü Şekil Bellek Davranışı (TYD) incelenmiştir. Levha olarak üretilen şekil bellekli alaşımların tek yönlü şekil bellek davranışı Şekil 2.6 de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Şekil bellek alaşımlarda tek yönlü şekil bellek davranışı (TYD)

Şekil bellek özelliğinin görülebilmesi için deformasyonun dislokasyon kayması ile değil ikizlenme benzeri bir mekanizma ile olması gerekir. Martenzit varyantları arasındaki ikizlenme ilişkisi plakalar arasındaki sınırların düşük enerjili ve hareketli olmasını sağlar. Malzeme gerilime maruz kaldığında plakaların rahatça kayabilmesi varyantların gerilime göre yeniden düzenlenmelerine olanak sağlar. Hareketli ikiz sınırlar sayesinde bütün varyantlar gerilime en uygun şekilde yönlendirilmiş varyantlara

dönüşür. Çift Yönlü Şekil Bellek Davranışı (ÇYD) ise malzemenin yüksek ve düşük sıcaklık şekillerini dışarıdan bir etkiye ihtiyaç duymaksızın hatırlamasıdır.



Şekil 2.7 Şekil bellekli alaşımlarda çift yönlü şekil bellek davranışı (ÇYD)

Bu özelliğin görülebilmesi için soğuma sırasında bazı martenzit varyantların diğerlerine tercihen oluşması gerekmektedir. Bu dizi termomekanik işlem sonucunda yapı içerisinde oluşan dislokasyonlar martenzit plakaları dizilimlerinin sabitlenmesine sebep olurlar. Isıtma süresinde martenzit fazı yok olmasına rağmen, dislokasyonlar kaybolmazlar. Bunu takiben yapılan soğutma sırasında martenzit plakaları dislokasyonların yapı içerisinde yarattığı gerilimi karşılayabilmek amacıyla yine aynı dizilimde oluşmayı tercih ederler. Tipik bir termodinamik işlem süresinde, alaşım bir dizi eğitim döngüsüne tabi tutulur. Bu döngülerin her biri, istenen şekle ulaşmak için, deformasyon geriliminin kaldırılması, dönüşüm sıcaklığı üzerine ısıtma ve soğutma işlemlerinden oluşur. Isıl işlemlerle oluşturulan döngüler sonucu meydana gelen intermetalik çökeltilerin çift yönlü şekil belleğinin oluşmasında büyük önemi bulunmaktadır.

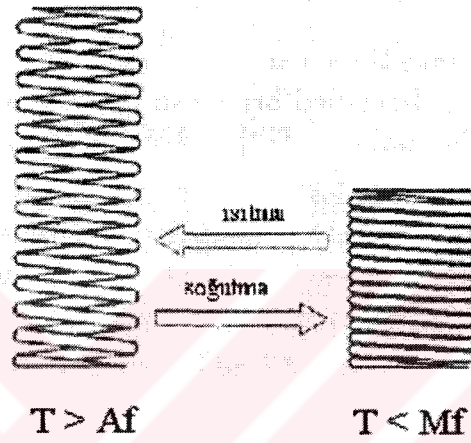
İki yönlü şekil bellek etkisinin oluşturulması için aşağıdaki yöntemlerden birisi uygulanabilir[3]:

a. Numune martenzitik konumda iken deformasyona maruz bırakılır, sonra A_f sıcaklığı üzerine ısıtılır (tek yönlü şekil bellek etkisi) ve daha sonra M_f sıcaklığı altına soğutulur. Eğer başlangıçtaki deformasyon yeterli büyüklükte ise ve/veya çevrim birkaç defa tekrarlanırsa soğutma sırasında iki yönlü şekil bellek davranışı görülür. Yani, numune soğutma ile başlangıçtaki düşük sıcaklık konumuna döner. Bu, şekil bellek etkisi eğitimi olarak adlandırılır.

b. Numune A_f sıcaklığının üzerinde birkaç defa deformasyona maruz bırakılır. Yükleme sırasında numunede gerilme esaslı martenzit oluşur, yük kaldırıldığında

martenzit kaybolur ve numune ilk şeklini alır. Numune daha sonra M_f sıcaklığı altına soğutulduğunda iki yönlü şekil bellek etkisi gösterir. Bu, gerilme esaslı martenzit eğitimi olarak adlandırılır.

c.Yukarıdaki iki çevrimin birleştirilmesi (birleşik eğitimi) ile en iyi sonuç alınmaktadır. Bu eğitimde numuneye A_f sıcaklığı üzerinde yükleme yapılır. Ve birim uzamayı koruyarak numune M_f sıcaklığı altına soğutulur. Daha sonra numunenin üzerinden yük kaldırılır ve A_f sıcaklığı üzerine ısıtılır. Eğer bu çevrim birkaç defa tekrarlanırsa iki yönlü şekil bellek davranışı meydana gelir (Şekil 2.8)

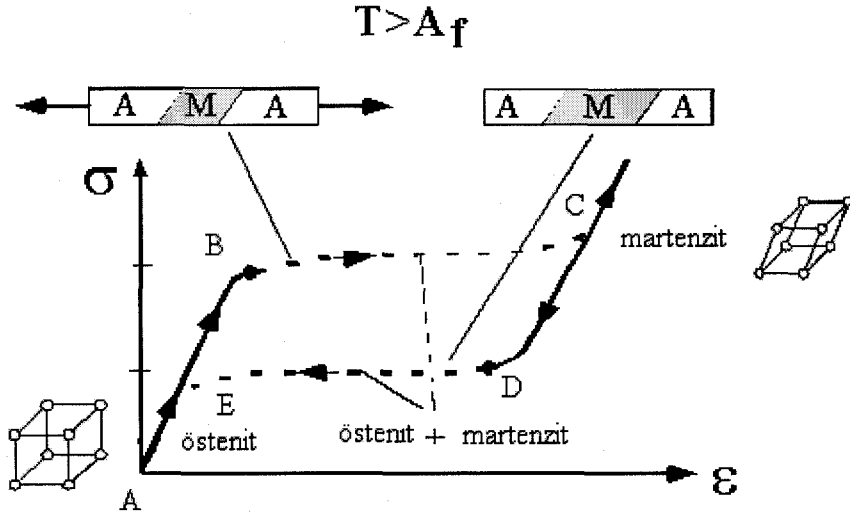


Şekil 2.8 Şekil bellekli alaşım yayda ÇYD mekanizması

2.2 Şekil Bellekli Alaşımların Süperelastik Özelliği

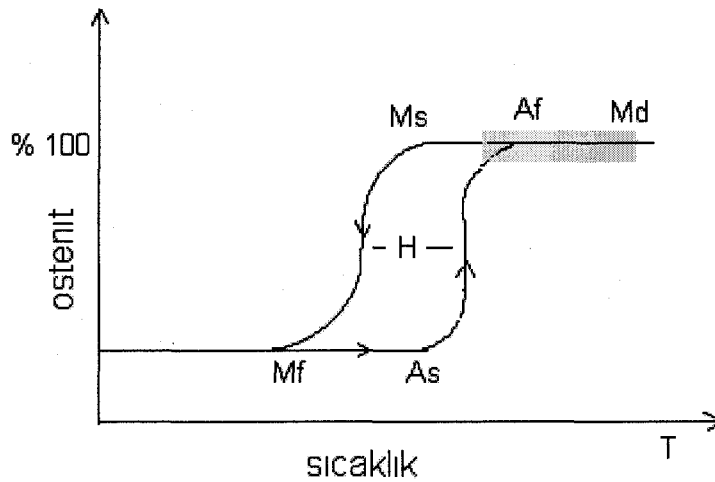
Şekil bellekli alaşımlarda görülen süperelastik özellik, şekil bellek etkisinde olduğu gibi termoelastik martenzitik faz dönüşümü sonucu oluşan bir özelliktir. Alaşıma A_f sıcaklığı üzerinde sabit bir T sıcaklığında belirli bir gerilme uygulandığında Şekil 2.9’de gerilme-birim şekil değiştirme diyagramında görüldüğü gibi bir eğri elde edilir. Şekil 2.9’daki A-B arasındaki bölge elastik deformasyona aittir. B noktasından itibaren ilk martenzit plakalar oluşmaya başlar. B-C arasında alaşımda martenzite dönüşmüş oran artarak devam eder. C noktasına varıldığında martenzitik dönüşüm tamamlanmıştır. Bu noktadan itibaren gerilme artırıldığında düşük oranda bir elastik deformasyondan sonra, martenzit plastik akma noktasına ulaşılır ve numune kopma gerçekleşinceye kadar plastik deformasyona uğrar. Alaşım C noktası üzerinde plastik deformasyona uğramadan gerilme bırakılırsa şekil değişimi geri dönüşümlü olarak telafi edilir. C-D arasındaki bölgede elastik geri dönüşüm gerçekleşir. D-E arasında

ise martenzitik yapı oranı giderek azalarak ana faz oluşumu başlar. E-A arasında ana faza ait elastik geri dönüşümün olmasıyla toplam şekil değişimi giderilmiş olur.



Şeki 2.9 Şekil bellekli alaşımlarda superelastik özellik

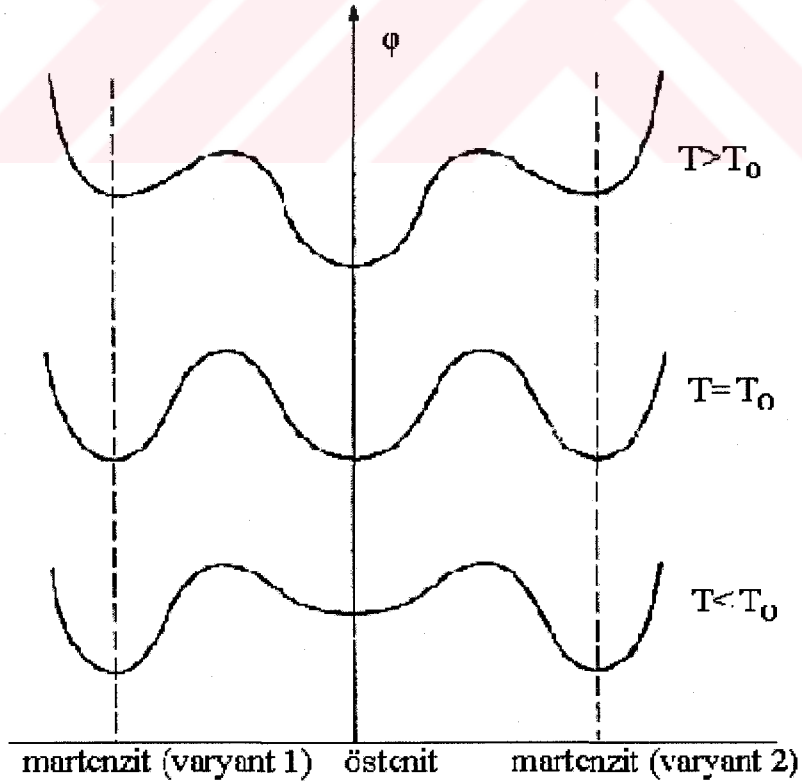
Şekil bellekli alaşımlarda martenzitik dönüşümün A_f sıcaklığı üzerinde mekanik olarak sağlandığı faz dönüşümüne “gerilmenin neden olduğu martenzit” denir. % 100 oranında östenitik yapıdaki şekil bellekli alaşım gerilmeye maruz bırakılarak, martenzitik dönüşümün gerilme etkisi altında oluşması sağlanırsa, gerilme kaldırıldığında malzeme elastik olarak tekrar eski haline döner. Bu durumda alaşımda kalıcı şekil değişimi olmaksızın % 8’e varan birim şekil değişimleri süperelastik olarak geri kazanılır. Şekil 2.10’da şekil bellekli alaşımların süperelastik özellik gösterdiği (A_f , M_d) bölgesi gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Şekil bellekli alaşımlarda superelastik özellik gösteren bölge

2.3 Martenzitik Dönüşümle ilgili Serbest Enerji Değişimi Teorisi

Ostenit fazdan martenzit faza dönüşüm, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçişle birlikte olur. Belirli bir sıcaklığın altında martenzit fazın serbest enerjisi, ostenit fazın serbest enerjisinden daha düşük olmaya başlar. Bu noktadan itibaren alaşım daha düşük enerjili kristal yapısına geçmek ister ve martenzitik dönüşüm görülmeye başlanır. M_s (martenzit başlangıç). Tamamen martenzit plakaların oluşması ile birlikte martenzitik dönüşüm tamamlanır. M_f (martenzit son). Bunun tersi olarak alaşımın ısıtılması durumunda, yüksek sıcaklıktaki düşük serbest enerjili faz olan ostenit fazına dönüşüm A_s (ostenit başlangıç) sıcaklığında başlar ve A_f (ostenit son) sıcaklığında malzemenin kristal yapısı tamamen ostenitik olur. Bu termodinamik dönüşüm şekil 2.11’de gösterilmiştir. Enerji yoğunluğunun (ϕ) bir fonksiyonu olan sıcaklığın değişimi martenzit fazdan ostenite ve ostenit fazdan martenzite faz dönüşümünün oluşmasını sağlamaktadır. $T < T_0$ sıcaklığında martenzit varyantların enerji yoğunluğu ostenit fazının enerji yoğunluğundan daha küçüktür. $T > T_0$ sıcaklığında ise ostenit fazın enerji yoğunluğu martenzit varyantlara göre daha düşüktür. Böylece ostenitik faz dönüşümü meydana gelir [4]



Şekil 2.11 Farklı sıcaklıklarda enerji yoğunluğu [4]

2.4 Şekil Bellek Özelliği Gösteren Alaşımlar

Başta Bakır, Nikel ve Demir esaslı olmak üzere birçok alaşım şekil bellek etkisi ve superelastik özellik gösterir. Tablo 2.1’de bazı şekil bellekli alaşımlar bileşimi ve dönüşüm sıcaklıkları ile birlikte gösterilmektedir. Fakat bu alaşımların çoğunun, çok düşük dönüşüm sıcaklık aralığına sahip olma, dar histerisis aralığı gösterme veya yüksek üretim maliyetleri gibi nedenlerden dolayı endüstriyel uygulamalarda tercih edilme oranı düşüktür.

Tablo 2.1. Bazı şekil bellekli alaşımların bileşim oranları, martenzitik dönüşüm sıcaklıkları ve histerisisleri [5,6]

Alaşım	Bileşim Oranı	Martenzitik Dönüşüm Sıcaklığı M_s (°C)	Histerisis
Bakır Esaslı			
CuZn	% 38.5 / 41.5 Zn (ağ.)	-180 ile -10 arası	~ 10
CuAuZn	% 23~28 Au , % 45~47 Zn (at.)	-140 ile 100 arası	~ 35
CuAlNi	% 14 Al , % 3.5 Ni (ağ.)	-150 ile 200 arası	~ 35
CuSn	~ %15 Sn (at.)	-120 ile 30 arası	~ 10
Cu Mn	% 5/35 Cu (at.)	-250 ile 180 arası	~ 25
Nikel Esaslı			
NiTi	% 49-51 Ni (at.)	-50 ile 100 arası	~ 30
NiAl	% 36-38 Al (at.)	-180 ile 100	~ 10
Demir Esaslı			
Fe-Mn-Si	% 32 Mn, % 6 Si	-200 ile 150 arası	~ 100
FePt	% 25 Pt (at.)	~ -130	~ 4
FePd	% 30 Pd (at.)	~ -100	

Bu alaşımlar arasında endüstriyel uygulamalara en yatkın özellik gösterenler Bakır ve Nikel esaslı alaşımlardır. Bakır esaslı şekil bellekli alaşımlar konusunda Türkiye’de çok sayıda deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların başlangıcı 1986 yılında Erol SELİMBEYOĞLU ve Sabri ALTINTAŐ tarafından [6] CuAlNi alaşımlarında şekil bellek özelliğinin incelenmesi ile olmuştur. Daha sonraki yıllarda ODTÜ Metalurji Mühendisliği Bölümü’nde şekil Bellekli Alaşımlar Laboratuvarında şakir BOR ve arkadaşları [7,8,9,10,11] tarafından CuAlNi ve CuZnAl şekil bellekli alaşımlarla ilgili olarak üretim, mekanik karakterizasyon, DSC yöntemiyle dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi konularında farklı çalışmalar yapılmıştır.

Nikel esaslı alaşımlar bakır esaslı alaşımlara nazaran daha yüksek oranda şekil belleği ve süperelastik özellik gösterir. Bundan dolayı Nikel esaslı alaşımlardan biri olan NiTi alaşımı en fazla ticari ilgi uyandıran şekil bellekli alaşımdır. NiTi şekil bellekli alaşımların fiziksel ve mekanik özellikleri ile alaşımın kullanılma alanları konuları Üçüncü Bölümde anlatılacaktır.

3. NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR VE KULLANIM ALANLARI

3.1 NiTi Şekil Bellekli Alaşımların Genel Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Nikel-Titanyum (Ni-Ti) alaşımında şekil bellek etkisinin keşfi 1962’de W.J.Buehler ve arkadaşları tarafından A.B.D. Deniz Savaş Araçları Laboratuvarında olmuştur. Ticari ismiyle Nitinol (Ni-Ti Naval Ordnance Laboratory) olarak adlandırılan bu alaşım, deformasyon ve sıcaklığa bağlı olarak çok güçlü mekanik bellek göstermektedir. Tablo 3.1’de NiTi ve bakır esaslı şekil bellekli alaşımlar fiziksel ve mekanik özelliklerine göre karşılaştırılmıştır [12].

Tablo 3.1 Nikel ve bakır esaslı şekil bellekli alaşımların karşılaştırılması [12,13]

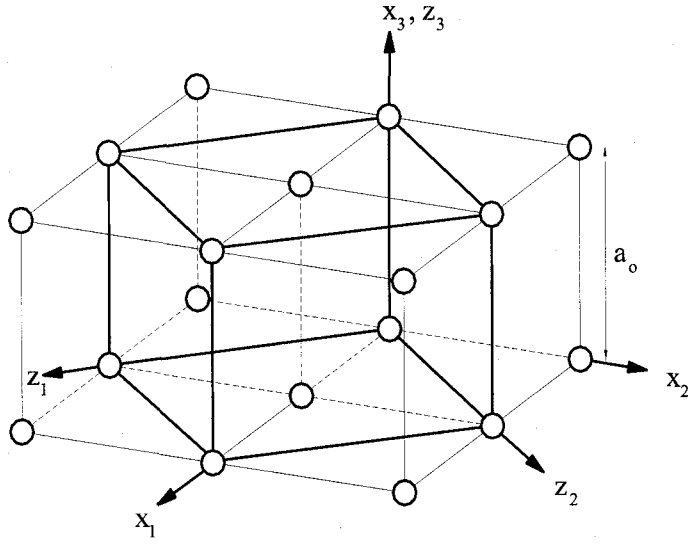
Özellik \ Alaşım	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Dönüşüm Sıcaklık Aralığı (°C)	-50 ile +100 arası	-200 ile +100 arası	-150 ile +200 arası
Histerisis	30	15	20
Maksimum TYD (%)	8	4	6
Maksimum ÇYD (%)	4	0.8	1
Yorulma dayanımı (N/mm ²)	800-1000	400-700	700-800
Yorulma sınırında uygulanabilir gerilme (N/mm ²)	150	75	100
Yorulma ömrü	>100 000	10 000	5 000
Yoğunluğu (g/cm ³)	6,45	7,9	7,15
Elektrik direnci (μ.Ω.cm)	80-100	7-12	10-14
Elastisite modülü (Gpa)	50	70-100	80-100
Korozyon direnci	çok yüksek	düşük	yüksek

NiTi alaşımlarının tek yönlü ve çift yönlü şekil bellek kabiliyeti, yorulma ömrünün ve korozyon direncinin bakır esaslı alaşımlara göre daha yüksek olması alaşımların kullanım alanını yaygınlaştırmaktadır. Elektrik direncinin 80-100 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$. olması sayesinde, alaşım üzerinden elektrik akımı geçirilerek şekil değişimi için gerekli sıcaklık derecesine hızla ulaşılabilir.

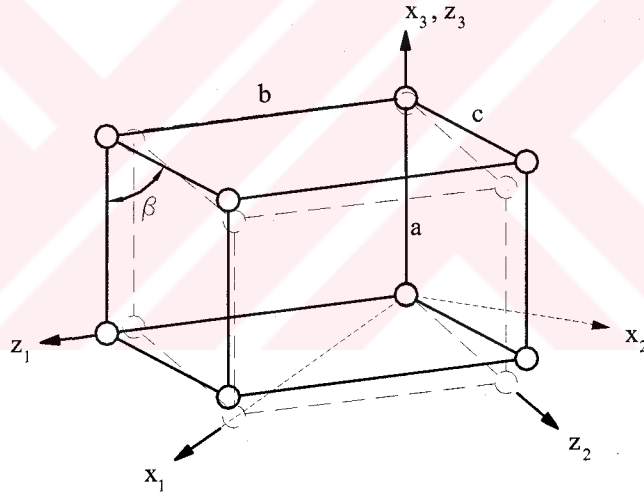
NiTi şekil bellekli alaşımların şekil bellek etkisi ve süperelastik özelliğinin sağladığı avantajlar birçok alanda geleneksel kullanımı bulunan 300 serisi paslanmaz çeliklerin yerini almasını sağlamıştır. Tablo 3.2’de NiTi ve 300 serisi Paslanmaz Çeliklerin özelliklerinin karşılaştırılması gösterilmektedir.

Tablo3.2 NiTi ve 300 serisi Paslanmaz Çeliklerin özelliklerinin karşılaştırılması [13,14]

Özellik	NiTi	Paslanmaz Çelik
Geri dönüşümlü uzama	% 8	% 0.8
Çekme Dayanımı	Martenzit 103-1100 Mpa Östenit 800-1500 Mpa	yaklaşık 760 MPa
Elastisite Modülü	Martenzit 28 - 41 Gpa Östenit 83 GPa	yaklaşık 193 GPa
Yoğunluk	6.45 g/cm ³	8.03 g/cm ³
Özdirenci	Martenzit 80 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ Östenit 100 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	72 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
Isıl Genleşme Katsayısı	Martenzit $6.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ Östenit $11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$17.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$



(a)

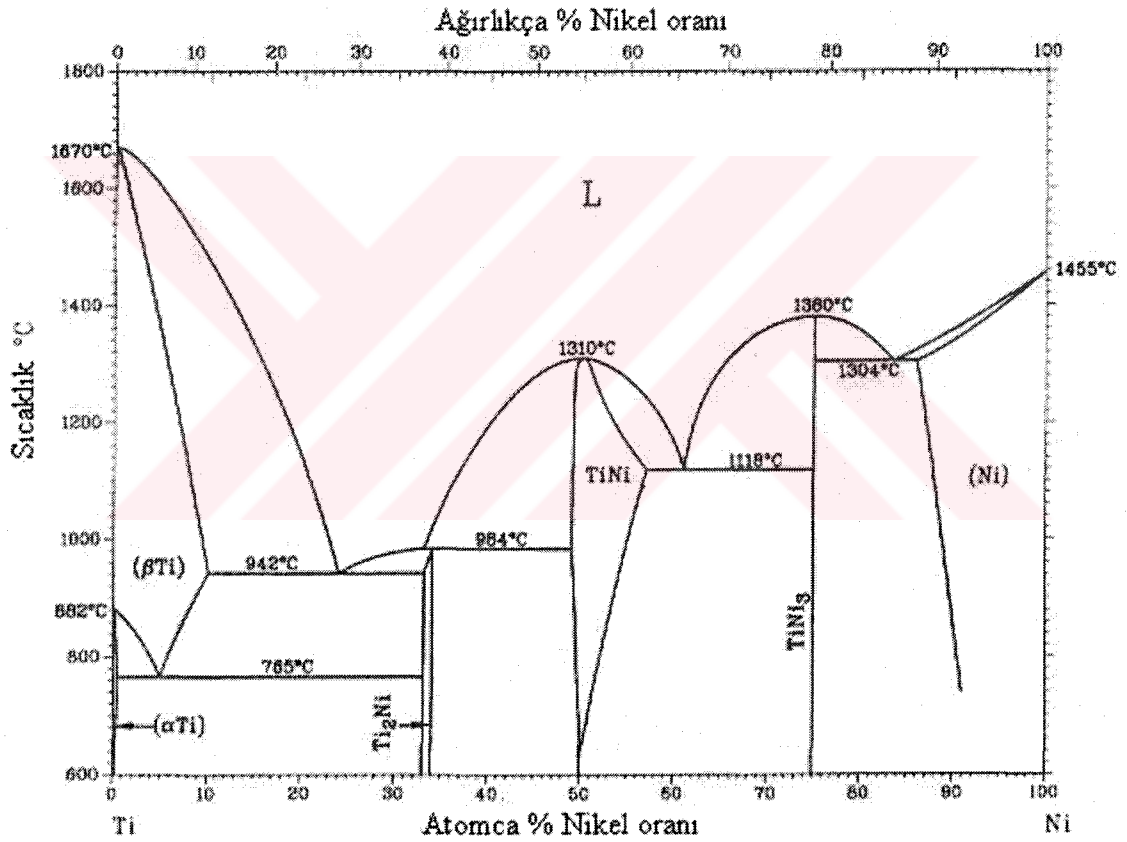


(b)

Şekil 3.1 (a) Martenzitik dönüşüm öncesi kristal yapı (b) Dönüşüm sonrası monoklinik yapı

Şekil 3.1a'da NiTi şekil bellekli alaşımın östenit birim hücresi ve bu hücrelerin oluşturduğu tetragonal hücre (z_1, z_2, z_3) görülmektedir. Burada östenit birim hücresi x_1, x_2, x_3 eksenlerine göre tanımlanmıştır. Martenzitik dönüşüm esnasında bu tetragonal yapı belirli bir genleme ile (Bain strain) Şekil 3.1b'deki monoklinik yapıya dönüşür. Şekil 3.1b'nin rotasyonu ile 12 farklı şekilde monoklinik birim hücre oluşur. Bunlar NiTi şekil bellekli alaşımın martenzit varyantlarıdır.

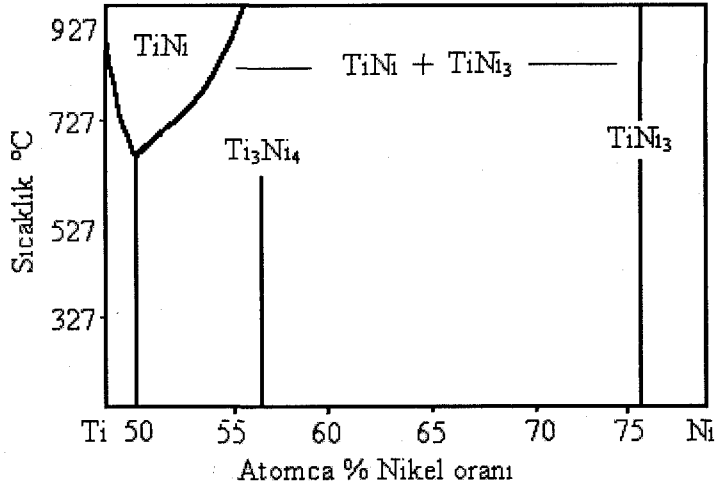
Şekil 3.2'deki Titanyum-Nikel faz diyagramı incelendiğinde, eşit oranda titanyum ve nikel atomlarından meydana gelen atomca % 50 Nikel bölgesinde intermetalik TiNi oluşumu görülür. Saf Titanyum ergime derecesi 1670°C, saf Nikel ergime derecesi 1455°C'dir. Eşatomik NiTi alaşımının ergime derecesi ise 1310°C'dir. TiNi intermetalik yapı 630 °C'den itibaren TiNi ara fazı oluşturur. Faz diyagramında nikelce zengin bölgede TiNi çözünürlüğü sıcaklıkla beraber değiştiğinden bu bölgede çökelme sertleşmesi görülebilir (TiNi₃ çökmesi). Titanyumca zengin bölgede ise çözünürlük sıcaklıkla beraber hemen hemen dik çıktığından Ti₂Ni çökmesi düşüktür.



Şekil 3.2 TiNi Faz Diyagramı [15]

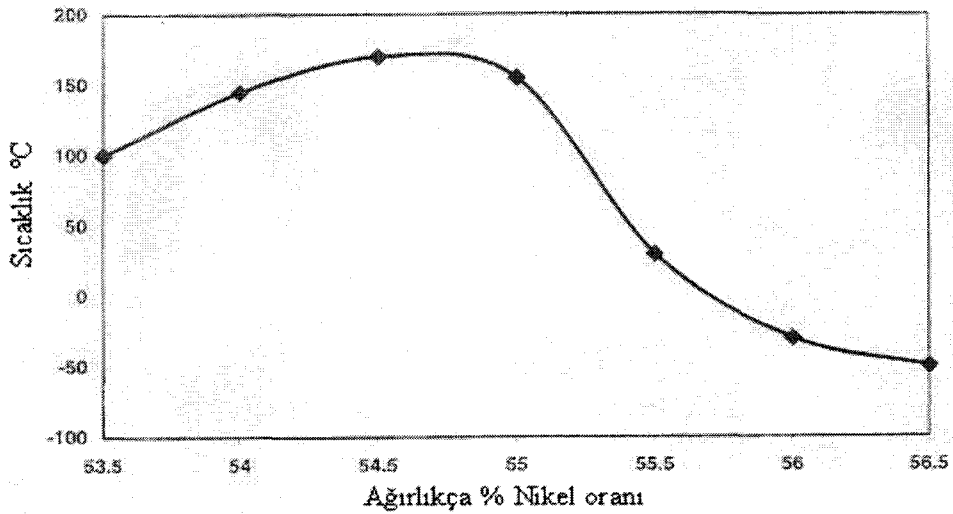
TiNi Faz Diyagramında atomca % 50 - %75 Nikel oranı arasında yapılan en son deneysel çalışmalarda, yapıda matriks ile koheran olan ince Ti₃Ni₄ çökeltileri ve NiTi arasında metastabil denge tespit edilmiştir [15]. Yapıdaki çok düşük oranda Ti₃Ni₄ çökeltileri bulunmasının, alaşımın şekil bellek karakteristiği ve malzeme dayanımını

etkilediği görülmüştür. TiNi faz diyagramında atomca % 50 - %75 Nikel oranı arasında Ti_3Ni_4 intermetalik oluşumu Şekil 3.3'de gösterilmektedir.



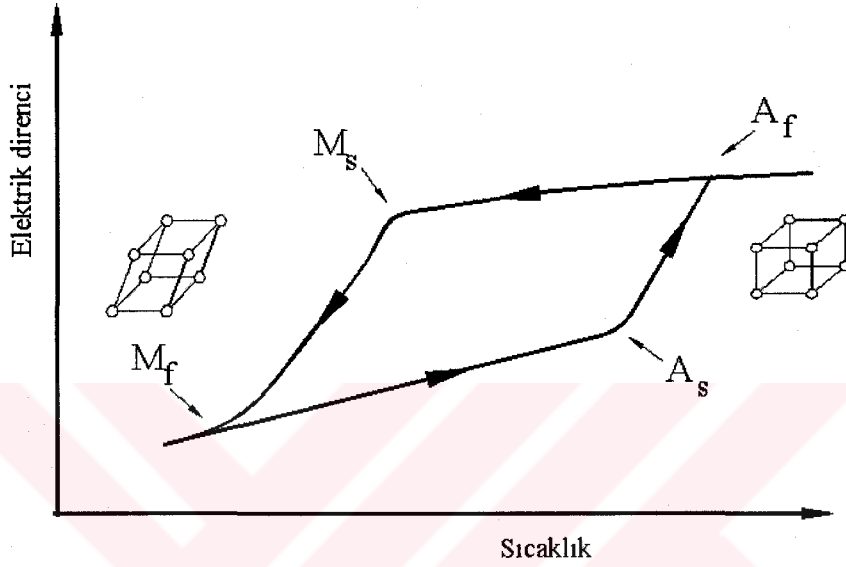
Şekil 3.3 TiNi Faz Diyagramında atomca % 50 - %75 Nikel oranı arasında Ti_3Ni_4 oluşumu [2]

Ni-Ti alaşımlarındaki nikel ve titanyum oranları faz dönüşüm sıcaklığını büyük oranda değiştirmektedir. Bileşimde ağırlıkça % 4 lük bir değişim 100 °C'den fazla martenzit başlangıç (M_s) sıcaklığını değiştirmektedir. Şekil 3.4'de alaşımdaki ağırlıkça Nikel oranının değişimiyle oluşan A_s sıcaklığı eğrisi gösterilmektedir. Alaşımda ağırlıkça %54 oranında Nikel bulunması durumunda A_s sıcaklığı 150°C'ye yaklaşırken, ağırlıkça Nikel oranı % 56 oranında olduğunda A_s sıcaklığı -50°C'lere düşmektedir.



Şekil 3.4 Alaşımdaki ağırlıkça Nikel oranının değişimiyle oluşan A_s sıcaklığı eğrisi [16]

Şekil bellekli alaşımların faz dönüşüm sıcaklığının tespitine yönelik farklı uygulamalar bulunmaktadır. Alaşım martenzit ve östenit fazlarda öz direnç farklılıkları göstermektedir. Alaşım ısıtılıp soğutulurken öz direnci ölçüldüğünde aşağıda Şekil 3.5’deki gibi öz direnç–sıcaklık diyagramı elde edilmektedir. Bu diyagram kullanılarak faz dönüşüm sıcaklığı bilinmeyen bir alaşımların faz dönüşüm sıcaklıkları tespit edilebilir.



Şekil 3.5 Martenzit / Östenit fazlarında alaşımların öz direnci – sıcaklık diyagramı [17]

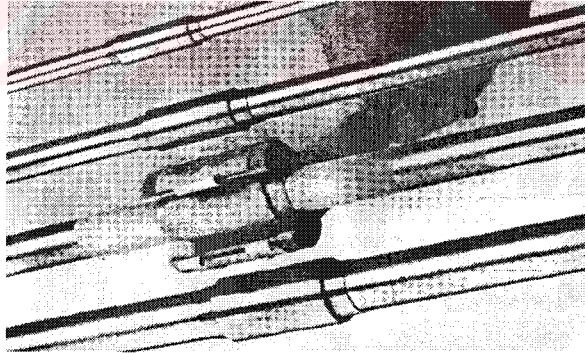
Diğer bir metot ise alaşımlardan alınacak küçük bir numunenin belli sıcaklık aralıklarına ısıtılıp soğutulması ile göstereceği ekzotermik ve endotermik piklerin incelenerek faz dönüşüm sıcaklıklarının tespitidir. Bu metotta DSC (diferansiyel tarama kalorimetresi) cihazı kullanılır. İTÜ Robot El üzerinde kullanılan NiTi levhaların faz dönüşüm sıcaklıkları DSC metodu kullanılarak tespit edilmiştir.

3.2 Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşımların Kullanım Alanları

Şekil bellekli alaşımların kullanım alanları genel olarak endüstriyel ve tıp uygulama alanları olarak iki grupta incelenebilir. Bugüne kadar NiTi şekil bellekli alaşımlarla ilgili olarak başta endüstri ve tıp olmak üzere çeşitli alanlarda 15.000 üzerinde patent alınmıştır.

3.1. NiTi Şekil Bellekli Alaşımların Endüstriyel Uygulamaları

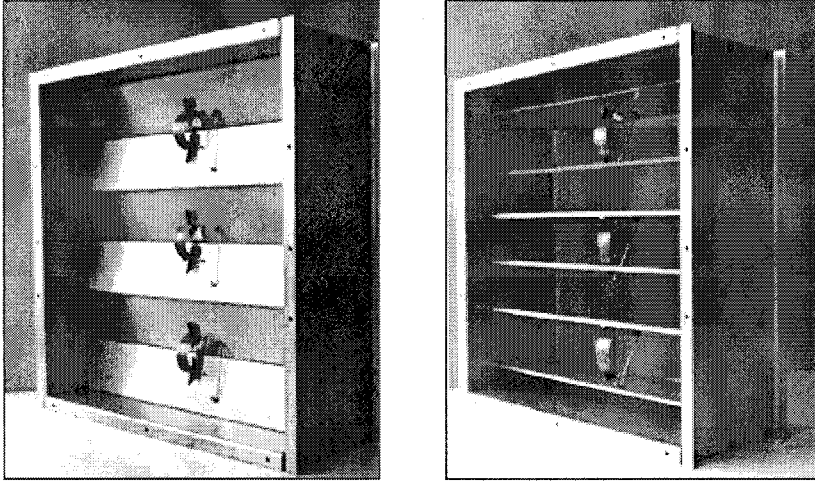
Şekil bellekli alaşımlardan NiTi alaşımının ilk kullanılma yerlerinden biri 1969'da F-14 Jet uçaklarında hidrolik boru bağlama bileziği olarak olmuştur. (Şekil 3.7) Hidrolik borular bağlantı yapmak için standart kaynak tekniklerinin kullanılması zor olan uçağın alüminyum gövdesine çok yakın bölgelerdedir. Şekil belleği verilmiş bilezik sıvı nitrojen içerisinde martenzit fazda bulunurken çıkartılıp hidrolik boru üzerine takıldığında ortam sıcaklığına ulaşmasıyla birlikte hidrolik boru üzerine sıkı bir şekilde oturur. Bağlama bileziği, sıvı nitrojen içerisindeki çok düşük sıcaklığa artık normal koşullarda ulaşamayacağından, her zaman boru üzerinde sıkı bir şekilde takılı olarak kalır. Endüstride benzer uygulamalar birbirlerine bağlantıları zor olan parçaların birleştirilmesinde kullanılmıştır [18].



Şekil 3.7 Hidrolik boru bağlama bileziği olarak nitinolun kullanılması [18]

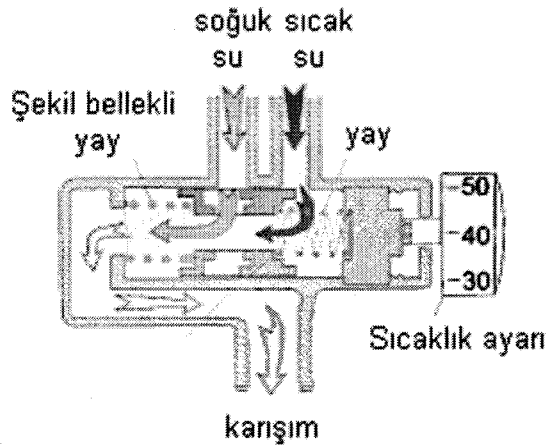
Ortam sıcaklığına göre otomatik olarak açılıp kapanan sera pencereleri ve fan kapakları ise alaşımın bir başka uygulama alanıdır. Şekil 3.8'de ortam sıcaklığına göre açılıp kapanan sera pencere sistemi görülmektedir.

Uzay anten sistemlerinde ise düşük sıcaklıkta paket olarak belli bir bölgeye ulaştırılan antenin ısınması ile birlikte normal anten şekline dönüştüğü uygulamalar ilk uygulamalar arasındadır.



Şekil 3.8 Ortam sıcaklığına göre açılıp kapanan sera pencere sistemi

NiTi alaşımların yay olarak kullanıldığı endüstriyel uygulamalardan biri de Şekil 3.9’da görülen çıkış sıcaklığı ayarlanabilir akışkan sıvı valfidir. Sistemin çalışma prensibi içerisinde bulunan yayların soğuk ve sıcak su girişlerini kayan bir parça vasıtasıyla açıp kapatarak istenilen sıcaklıkta sıvı çıkışını sağlamaktır. Sistemdeki suyun sıcaklığı arttığında şekil bellekli yay termoelastik faz dönüşümü ile ostenit sıcaklığına doğru çıkarken uzayarak kayan parçayı ileri doğru hareket ettirerek sıcak su girişini azaltmaktadır. Sistemdeki suyun sıcaklığı düştüğünde ise biraz önceki durumun tam tersi olarak şekil bellekli yay kısalarak diğer yayın baskısıyla kayan parça soğuk su girişini azaltmaktadır. Sonuçta uygun yay oranları seçilerek istenilen sıcaklıkta sıvı çıkışı sağlanabilmektedir.

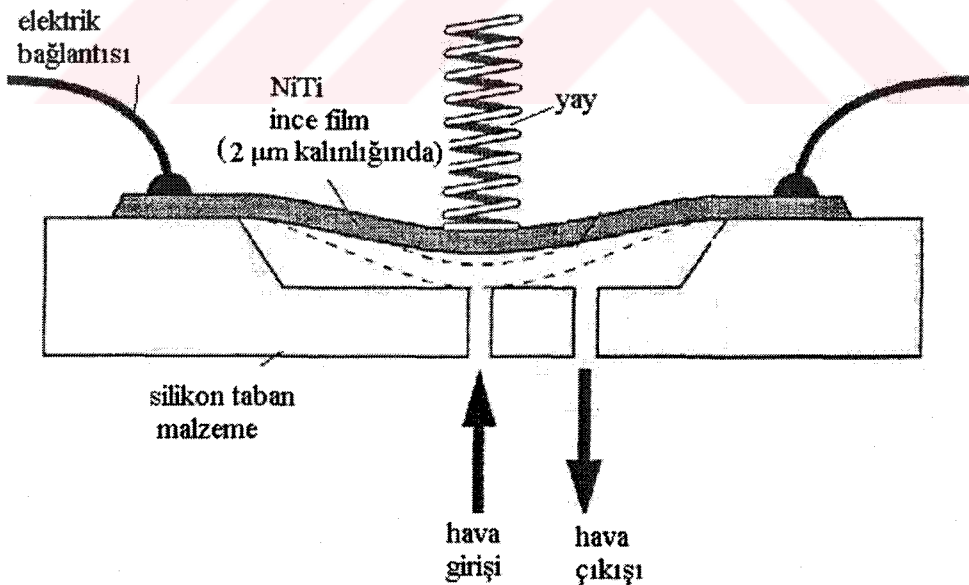


Şekil 3.9 Çıkış sıcaklığı ayarlanabilir akışkan sıvı valfi [17]

Son yıllarda supersonik uçakların dış yüzeyinde hava basıncı ile oluşan büzülmelerin engellenmesi için NiTi şekil bellekli alaşım gömülü, grafit-epoksi kompozit kullanılması araştırmaları devam eden çalışmalar arasındadır.

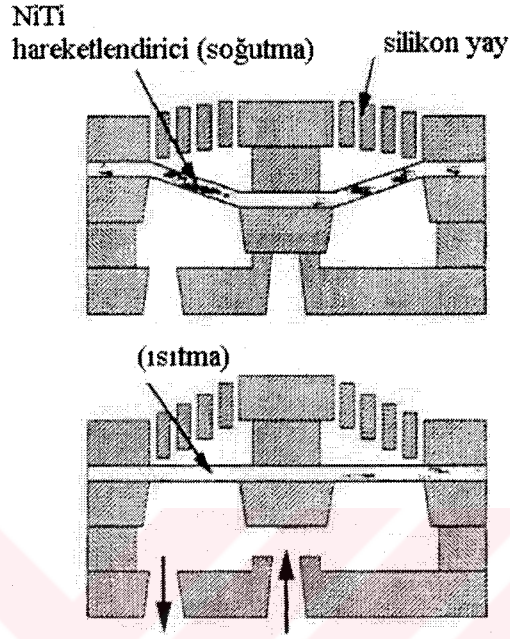
NiTi ince film kaplama çalışmaları ise, şekil bellek teknolojisine yeni bir boyut kazandırmıştır. Alaşımların şerit, tel veya yay halinde geleneksel kullanılmasının yanında mikro boyutlarda ince film olarak kaplanması ve üç boyutlu hareket elde edilmesi mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) içerisinde farklı tasarımlara olanak sağlamıştır [20].

Küçük ölçekli elektro-mekanik düzeneklerin ve sistemlerin incelendiği disiplinler arası bir bilim olan mikro-elektro-mekanik sistemlerin uygulamalarında ince film şekil bellekli alaşımların özellikle mikro hareketlendiriciler arasında kullanılma oranı artarak devam etmektedir. Şekil 3.10'daki NiTi ince film kullanılarak oluşturulan mikro valf; NiTi alaşımın termomekanik özelliğinden yararlanılarak hava giriş ve çıkışını periyodik olarak düzenlemektedir. İnce filmin Af sıcaklığı üzerine ısıtarak yukarı doğru hareketiyle valf açılmakta, yayın aşağı doğru itme hareketi ile tekrar valf kapanmaktadır. 15 milisaniye içerisinde tamamlanan bu döngü ile hava giriş çıkışı düzenlenmektedir.



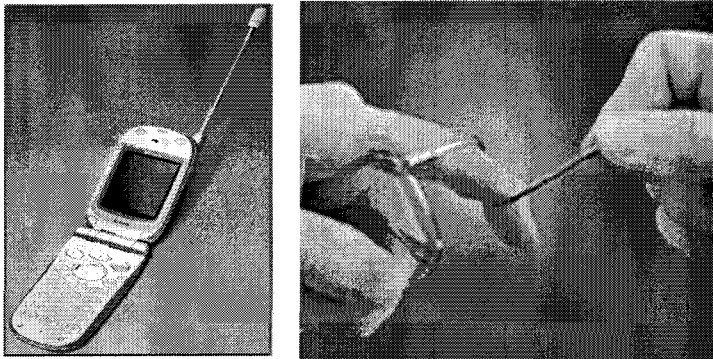
Şekil 3.10 NiTi ince film kullanılarak oluşturulan mikro valf [19]

Sisteme giren sıvının sıcaklığına göre sıvı çıkış oranını ayarlayan mekanizma ile çok düşük miktarlardaki sıvı transferi kontrollü olarak yapılmaktadır. Mikro ölçülerde sıvının sıcaklığının düşüşüyle Şekil 3.11’de görülen mikro valf kapanmakta, sıvının sıcaklığının artması ile NiTi hareketlendirici sıvı akışına olanak vermektedir.



Şekil 3.11 NiTi ince film kullanılarak düşük miktarlarda sıvı transferi yapılması [20]

Endüstriyel alanda şekil bellekli alaşımların süperelastik özelliği kullanılarak birçok endüstriyel gerecin daha etkin kullanımı sağlanmıştır. Cep telefonu anteni, gözlük çerçevesi gibi plastik deformasyona sorun yaratan parçalarda kullanılan şekil bellekli alaşımlar bu sorunun çözümü ile beraber hafiflik ve korozyon dayanımı da sağlamıştır. Şekil 3.12’de ŞBA kullanılarak yapılan cep telefon anteni ve gözlük çerçevesi görülmektedir.

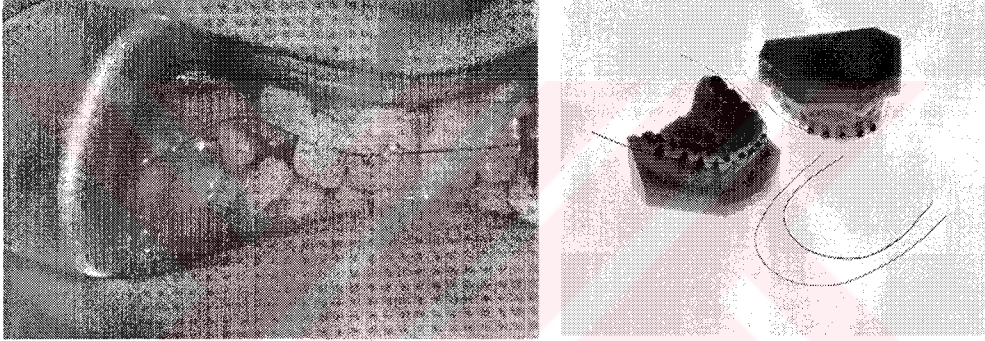


Şekil 3.12 NiTi alaşımının süperelastik özelliği kullanılarak üretilen cep telefonu anteni ve gözlük çerçevesi

3.2 NiTi Şekil Bellekli Alaşımların Tıp alanındaki Uygulamaları

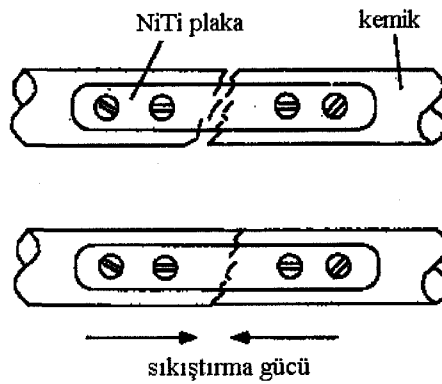
İnsan bedenine biyolojik uyumu yüksek olan NiTi şekil bellekli alaşımlar, dişçilikte ortodontik diş telleri, damar tıkanıklığında tıkanıklığı açan stentler ve ortopedide implantlar gibi birçok alanda diğer sistemlere tercih edilir hale gelmiştir (Şekil 3.13).

Ortodontik diş telleri çarpık dişleri diş kuvvet uygulayarak düşey mesafede uygun aralığa yerleştirmekte kullanılmaktadır. Ağızda dişlerin üzerine tutturulan bu tellerin performansı, dişlerin hareket etmesi ile uygulanan kuvvetin azalmaması ile ölçülebilir. Geleneksel olarak kullanılan paslanmaz çelik teller, elastik bölgede şekil değişimi neticesinde kuvvet uygulama özelliğini kaybetmekte olup tekrar değiştirilmeleri gerekir. Paslanmaz çeliğe oranla kuvvet uygulama özelliği sayesinde diş tellerinin değiştirilme sıklığını son derece azaltmaktadır.



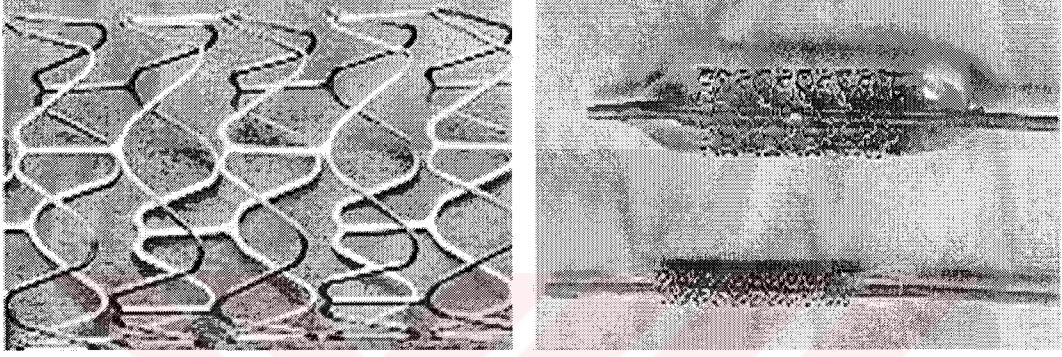
Şekil 3.13 Ortodontide kullanılan NiTi diş teli örnekleri ve uygulaması

Tıp alanında yapılan çalışmalar arasında NiTi alaşımının ortopedik kullanımı geniş yer almaktadır. NiTi plakalar kırılmış olan kemiğe vidalanarak bağlandığında iki parçayı sıkıştırma yönünde uyguladığı kuvvetle birleştirmektedir. İşlemin şematik gösterimi Şekil 3.14’de çizilmiştir.

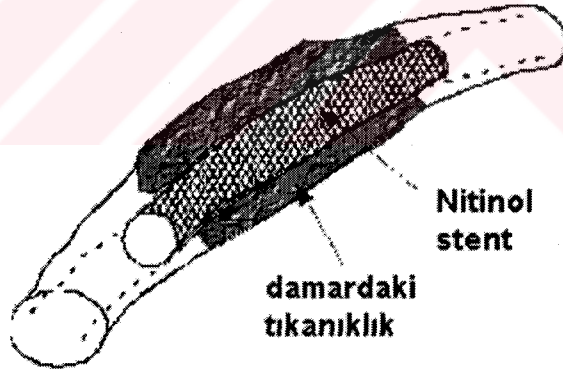


Şekil 3.14 Şekil bellekli alaşımların ortopedik kullanımı [19]

Nitinolun biyomedikal alandaki farklı bir kullanım örneği de kalp damar tıkanıklıklarının ameliyatsız tedavisinde kullanılan stentlerdir. Stentler, Şekil 3.15’de gösterildiği gibi radyal bir yay şekline sahip olup, damar tıkanıklığının bulunduğu bölgeye, martenzitik yapıda büzülmüş olarak bir baloncuk vasıtasıyla yerleştirilirler. Baloncunun çekilmesi ile vücut sıcaklığına ulaşan stent şekil bellek etkisi ile, dönüşüm göstererek, büzüştürülmeden önceki çapına genişlemek ister ve damara genişleme yönünde bir kuvvet uygular. Damar çeperinin genişlemesi ile neticelenen bu süreç, tıkanık olan damarın yüksek oranda açılmasını sağlar (Şekil 3.16).



Şekil 3.15 Damar tıkanıklığında kullanılan NiTi stent örnekleri



Şekil 3.16 Tıkanık olan damarın NiTi stentle açılması

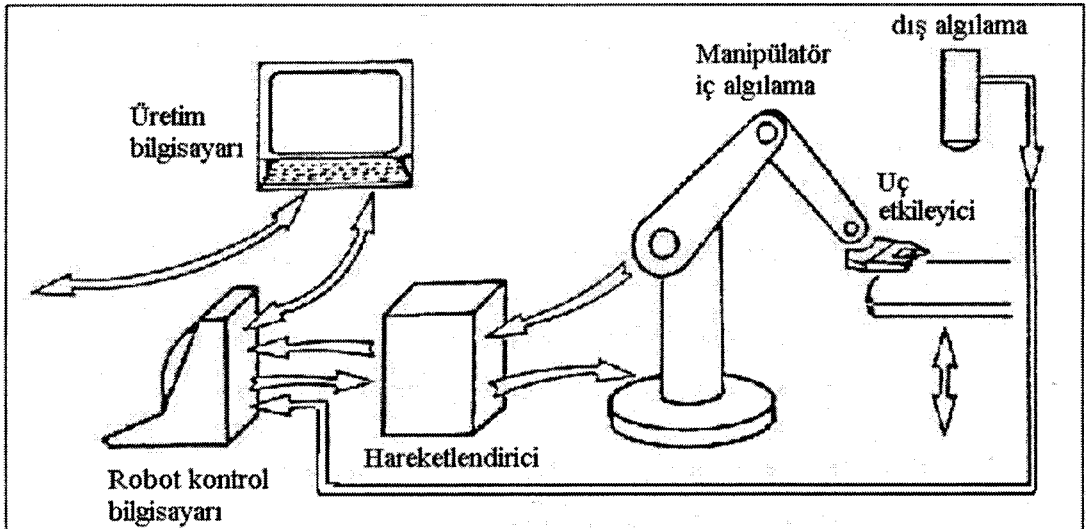
4. ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA UÇ ETKİLEYİCİLER

4.1 Giriş

Bilgisayarla bütünleşik üretim sisteminin (CIM) alt sistemlerinden biri olan robotik teknolojinin endüstriyel ortamda kullanım oranında son yıllarda çok büyük artışlar görülmektedir. Artık bir ihtiyaç haline gelen CNC tezgahları, esnek üretim sistemlerinin kullanılması ve endüstriyel robotların üretim teknolojisine girişi ile otomasyon, ürün kalitesi ve kontrol sistemi gibi alanlarda teknolojik gelişmeler yüksek boyutlara ulaşmıştır.

Bir robot sistemi teknik olarak birbirleriyle etkileşim halinde olan dört temel birimden oluşmaktadır (Şekil 4.1) [21].

- Robot kontrol bilgisayarı
- Mekanik işleyici (Manipülâtör)
- Hareketlendirici (Actuator)
- Uç etkileyici



Şekil 4.1 Endüstriyel robot sisteminin temel birimleri

Robot kontrol bilgisayarı, mekanik işleyici ve uç etkileyicinin hareketlerini kontrol eder, aynı zamanda uç etkileyicinin dış çevrelerle etkileşimini sağlar, değişen koşullarda koordinatlarını bilir.

Mekanik işleyici, robotun kolu olarak görev yapar ve endüstriyel robotun ana gövdesini oluşturur. Mekanik işleyicinin yapısındaki değişiklikler doğrudan endüstriyel robotun kapladığı iş alanını değiştirir.

Mekanik işleyici, robot kontrol bilgisayarı ve yapılacak iş arasında hem dış hem de iç çevre etkileşimini sağlayan algılayıcılarla birlikte, robotik teknolojisinde daha etkin robot sistem tasarımları için yerini almaya başlamıştır. Bir robot sisteminde algılayıcılar, robot kontrol bilgisayarı ve yazılımın geliştirilmesi ile robot daha kompleks işle yapabilecek duruma getirilebilir. Ayrıca robot sistemleri programlama dillerindeki gelişmeler, robotun çok daha yüksek oranda karar verme sistemi içerisine girmesini sağlayacak yöndedir. Bu alanda geliştirilmiş bilgisayar yazılımları da yapay zeka olarak nitelendirilmektedir.

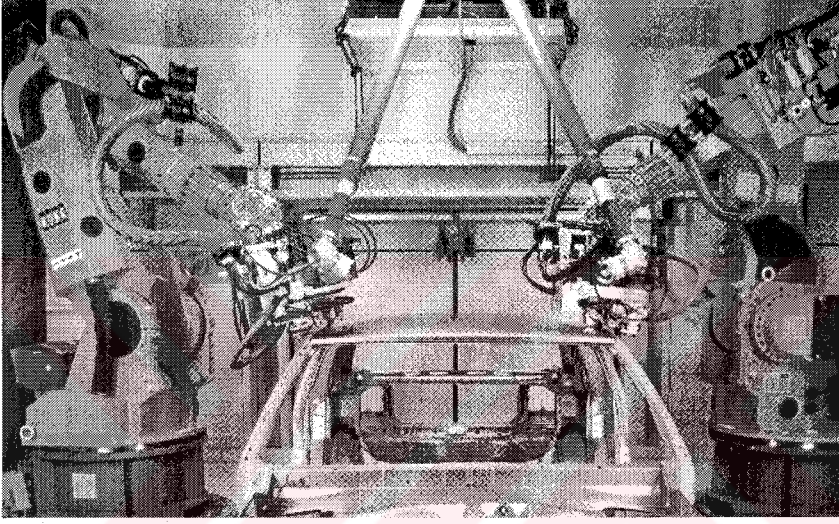
Hareketlendirici sistemleri ise mekanik işleyici ve uç etkileyicinin hareketini sağlayan sistemlerdir. Geleneksel hareketlendirici sistemleri elektrik, hidrolik ve pnömatik hareketlendirici sistemleridir. Sanayi devrimiyle birlikte ağır sanayide öncelikle hidrolik hareketlendirici sistemlerinin kullanılmasıyla hız kazanan hareketlendirici sistemleri günümüzde değişik endüstriyel alanlarda geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan şekil bellekli alaşımlar da, geleneksel hareketlendirici sistemleri yanında, kullanımı hızla artan yeni hareketlendirici sistemleri arasındadır.

Endüstriyel robotun uç etkileyicisi asıl işi yapan elemandır. Robot sistem tasarımlarında güdülen en önemli amaç; uç etkileyici olarak görev yapan kavrayıcılar ve diğer uç elemanlarının (kaynak pensesi, matkap, boya tabancası vb.) daha etkin bir şekilde görevini yapmalarını sağlamaktır.

Endüstriyel alanda bir robotun veya programlanabilir makine kolunun en sonundaki mekanizma uç etkileyici olarak adlandırılır. Uç etkileyiciler robot ile çevresi arasında arabirim elemanlarıdır. Robotik sistemlerdeki verimliliğin en hassas noktasını uç etkileyiciler oluşturur. Robot kolu ne kadar çok fonksiyonel olursa olsun eğer kullanılacak olan uç etkileyici yapılacak olan göreve uygun değilse robotun başarılı çalışması imkansızdır. Bu yüzden robot tasarımıyla ilgili problemlerin çoğu uç

etkileyiciler üzerine odaklanmıştır. Endüstriyel robotun, görevi en uygun şekliyle yapabilmesi için; o göreve uygun bir uç etkileyiciye sahip olması gerekir. Uç etkileyiciler biçim ve fonksiyonel çeşitlilik bakımından birçok farklılıklarla karşımıza çıkarlar.

Kaynak, kesme, matkap, zımpara, taşlama, boya tabancası mekanizmaları uç etkileyicilerin yaygın kullanım alanlarındandır. Şekil 4.2’de endüstriyel bir robot kol ucuna takılan kaynak mekanizması ile nokta kaynak işlemi yapan kaynak robotları gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Nokta kaynak işlemi yapan iki endüstriyel robot

En basit olarak kullanılan uç etkileyiciler pasif uç etkileyicilerdir. Bu tür uç etkileyicilerin hareket eden parçaları yoktur. Kanca, kepçe fırça gibi parçalar mekanik işleyicinin uç kısmına yerleştirilerek kullanılır. Bu tür uç etkileyicilerin basit olması, uç etkileyiciye işi yaptıracak olan mekanik işleyicinin daha fazla karmaşık hareketler yapması gereğini doğurmaktadır [22]. Çalışmanın bundan sonraki kısımlarında uç etkileyicilerin kavrayıcı olarak kullanımı üzerinde durulacaktır.

4.2 Kavrayıcılar

Kavrayıcılar, endüstride uzun yıllardan beri değişik amaçlar doğrultusunda birçok görevi yerine getirmek için farklı yapılarda tasarlanmış ve geliştirilmişlerdir. Büyük bir çoğunluğu endüstriyel alanda uygulama alanı bulmuş, fakat bazıları sadece laboratuvar çalışması olarak kalmıştır.

Endüstride uygulama alanı bulan kavrayıcılar, çalışma sistem ve tekniği bakımından farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Çalışmada kavrayıcılar tutuş şekillerine göre sınıflandırılmaktadır.

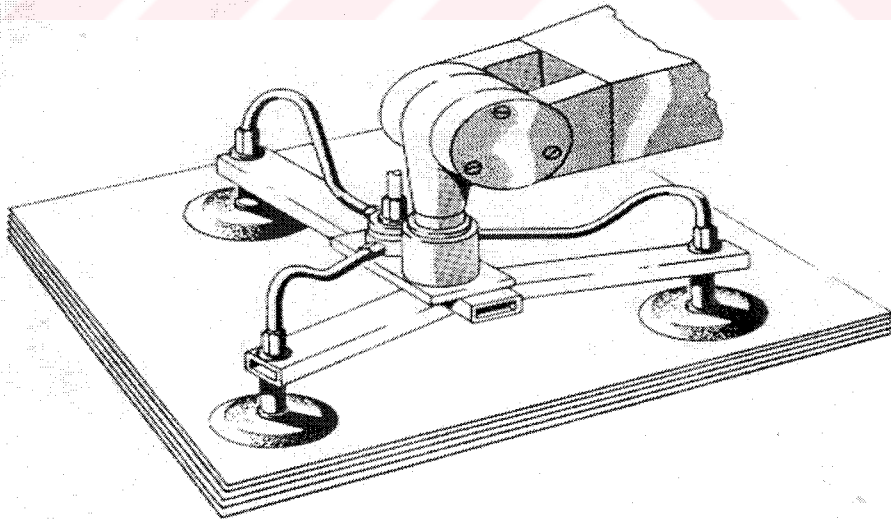
- a. Tek yüzeyden kavrayıcılar
- b. Çok yüzeyden kavrayıcılar

4.2.1 Tek yüzeyden kavrayıcılar

Tek yüzeyden kavrayıcılar; adından da anlaşılacağı üzere kavrama etkisini malzemenin sadece bir yüzeyini kavrayarak işlem görürler. Bu kavrayıcıları şu şekilde alt gruplara ayırmak mümkündür:

- a. Manyetik kavrayıcılar
- b. Vakumlu kavrayıcılar
- c. Yapışkan kavrayıcılar
- d. İğneli tip kavrayıcılar

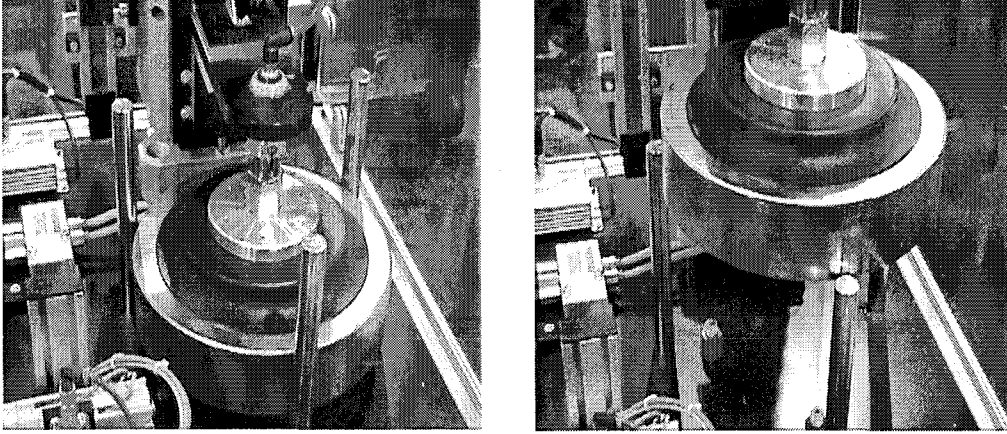
Bu işler için kullanılan yüzey genelde kavranılacak olan parçanın üst yüzeyidir. Bu sebepten üst yüzeylerin kavrayıcıların özelliklerine uygun olması gerekir. Örneğin; vakumlu tip bir kavrayıcı kullanılıyorsa üst yüzeyin hava geçirgen olmaması, gözeneksiz bir yapıya sahip olması gereklidir. Şekil 4.3’de vakumlu tip bir kavrayıcı örnek olarak gösterilmektedir



Şekil 4.3 Vakumlu kavrama

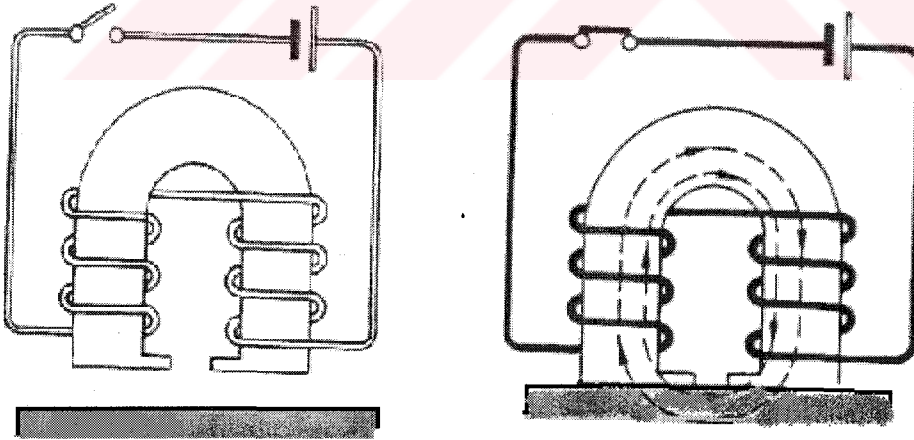
Eş yükselteli cam, karton, plastik, tahta veya daha birçok parçayı tutmak için bu tip kavrayıcılar kullanılır. Bu kavrayıcılar sıkıştırılmış hava vasıtasıyla emme yaratılarak

parçayı kaldırırılar. Hızlı ve sert bir biçimde bırakmayı engellemek için vakum kontrol valfleri kullanılır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Festo tarafından üretilen vakumlu kavrayıcıların bir uygulaması [23]

Manyetik kavrayıcı kullanılıyorsa kavranacak malzemenin üst yüzeyinin manyetik etki göstermesi gereklidir. Bu iş için sürekli veya elektrikli mıknatıslar kullanılır. Tutulması istenilen parça kesin olarak demir veya nikel alaşım gibi manyetik etkiye duyarlı malzemelerden yapılmış olmalıdır. Şekil 4.5’de elektromanyetik bir kavrayıcının çalışma sistemi gösterilmiştir.

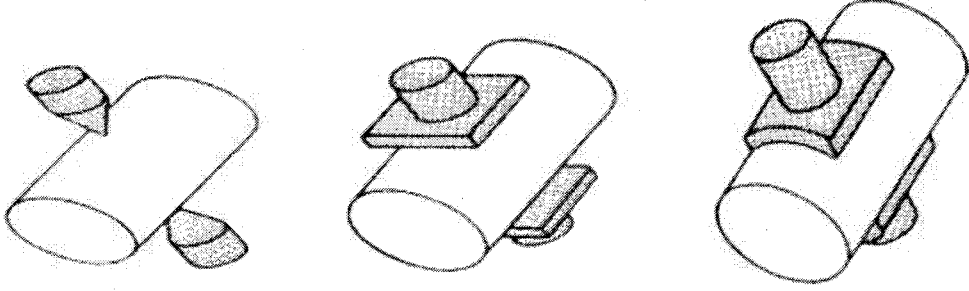


Şekil 4.5 Elektromanyetik kavrama ve bırakma

Bu tip kavrayıcılar kullanıldığında kavrayıcının malzemeye zarar vermemesi önemli bir noktadır. İğneli tip bir kavrayıcının kavrayacağı malzemeye iğnelerinin zarar vermemesi gereklidir. Bununla birlikte vakum, manyetik alan, yapışma gibi etkilerin malzemeyi hasara uğratmaması yine önemli bir konudur [24,25].

4.2.2 Çok yüzeyden kavrayıcılar

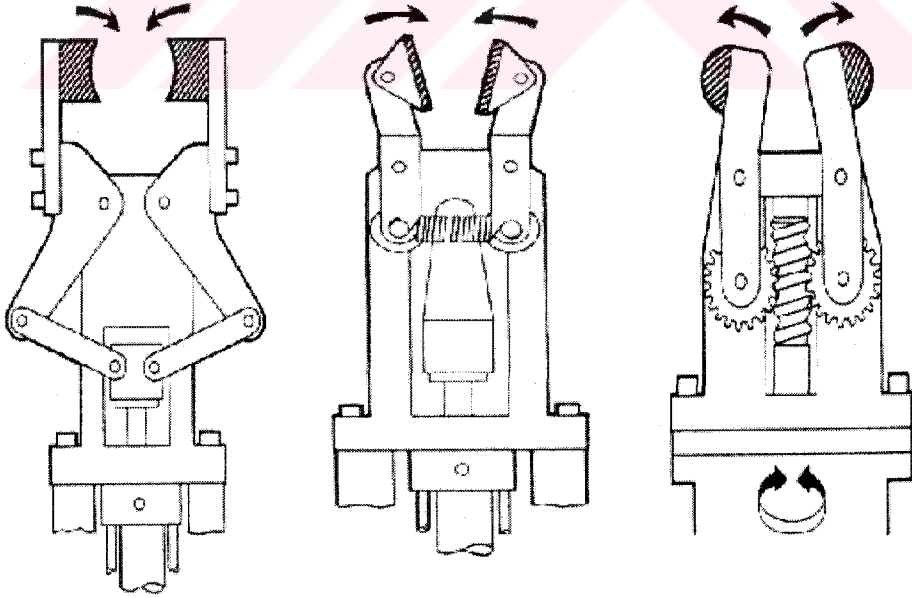
Çok yüzeyden kavrayıcılar kavranacak olan parçanın geometrik yapısına uygun kavramayı gerçekleştirme amacıyla geliştirilmiş kavrayıcılardır. Çok yüzeyden kavrayıcılar çeneli tip kavrayıcılar ve parmaklı tip kavrayıcılar olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Şekil 4.6’da basit çok yüzeyden kavrama örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Çok yüzeyden kavrayıcılara örnekler [26]

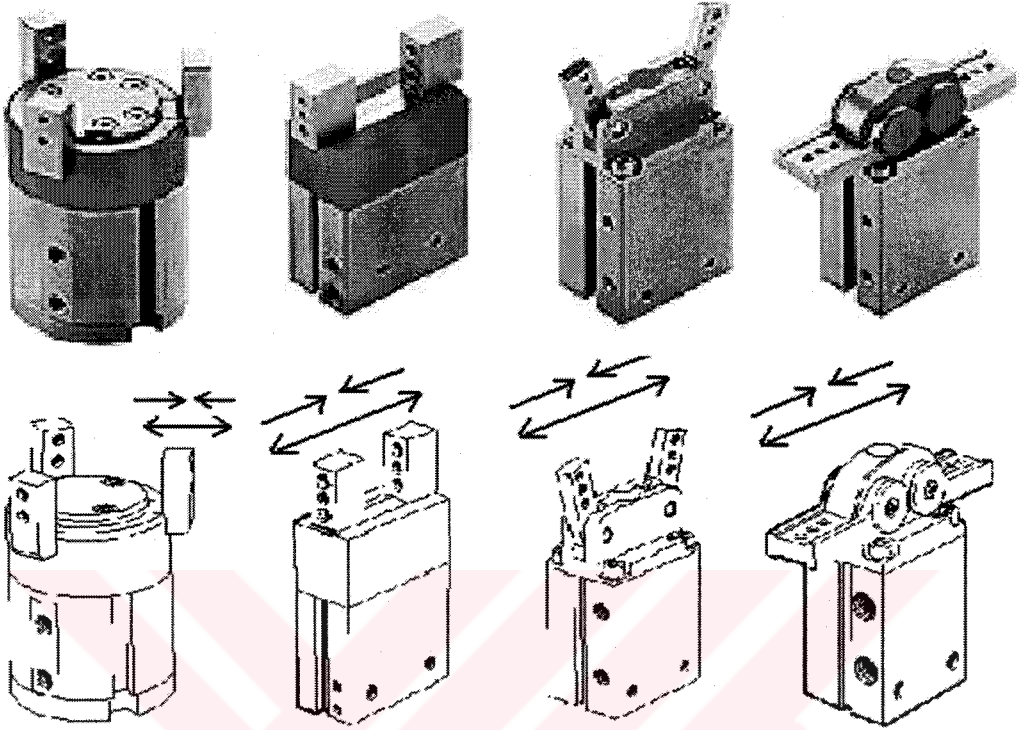
4.2.2.1 Çeneli tip kavrayıcılar

Bu tip kavrayıcılar Şekil 4.7’de gösterildiği gibi genelde parçanın iç veya dış yüzeyde çeneler arasında sıkıştırılması şeklinde kullanılmaktadır. Bunlar ikili veya çoklu çene şeklinde olabilir.



Şekil 4.7 Çeneli tip kavrayıcı örnekleri [26]

Endüstriyel ortamda geniş kullanım alanı bulan çeneli tip kavrayıcılara, Festo tarafından üretilen pnömatik olarak çalışan kavrayıcılara örnekler Şekil 4.8’de gösterilmiştir



Şekil 4.8 Festo tarafından üretilen çeneli tip kavrayıcılar [23]

4.2.2.2 Parmaklı Tip Kavrayıcılar (Robot Eller)

Robot uç etkileyiciler arasında parmaklı tip kavrayıcılar (robot eller), farklı geometrik boyutlardaki parçaları detaylı kavrama yeteneğine sahip olduklarından, hünerli kavrayıcılar veya hünerli robot eller olarak adlandırılırlar. Robot elin değişik görevler yapabilmesi için çok amaçlı tutucu özelliklerine sahip olması gereklidir. Robot el tasarımında ve çalışma fonksiyonlarının oluşturulmasında, her zaman en hünerli el olan insan elinin özellikleri ve şekli örnek alınmıştır. İnsan elinde kavrama davranışı incelendiğinde üç ayrı kavrama biçimi görülmektedir [27].

1. Parmak iç yüzeylerinin kullanıldığı kavramalar; güçlü kavrama denilen avuç içine cismin sıkıştırılması ile oluşur.

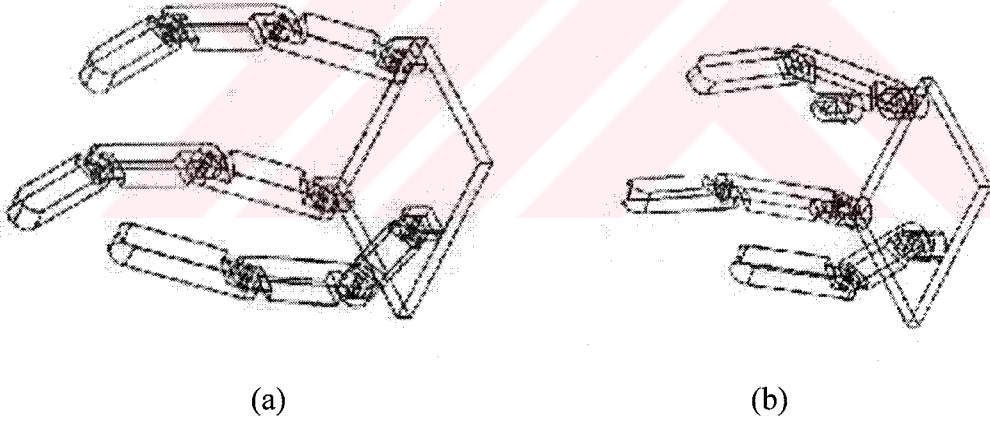
2. İnce iş kavramaları; parmak uçlarının kullanılması ile oluşur.

3. Bazı parmak yan yüzeylerinin kullanıldığı kavramalar.

Kavrama hareketi, cismin kavranmasında parmakların kavrama alanı ve kavramanın kararlı bir kavrama olması ile beraber düşünölmelidir. Kavrama hareketi analitik olarak düşünöldüğünde üç ana kısıttan söz edilebilir. Kavranacak parça kısıtı (parçanın şekli, kayganlığı, kırılğanlığı), kavrama kısıtı (maksimum hareket alanı ve parmakların maksimum açılması) ve görev kısıtı (parçanın ne yapılacağı). Bu temel kısıtlar dikkate alınarak mümkün kavrama alanı ortaya çıkarılabilir Robot el tasarım ve imalatında önemli konular; elin fonksiyonelliğı, boyutları, imalat ve bakım kolaylığı olarak sayılabilir.

Robot el kinematiğı incelendiğinde robot el hareketlerini dört temel kinematik konfigürasyonda sınıflandırmak mümkündür. Silindirik, esnek, parmak yan yüzeylerinin kullanıldığı ve karşılıklı parmaklardan oluşan bu dört temel konfigürasyon aşağıda ayrı ayrı açıklanmıştır.

Esnek tip robot el, en basit kinematik tasarıma sahip robot eldir. Şekil 4.9a'da tasarımı gösterilen bu robot elde parmaklar, paralel eksenli açısai eklemleri bağlantılardan oluşur.

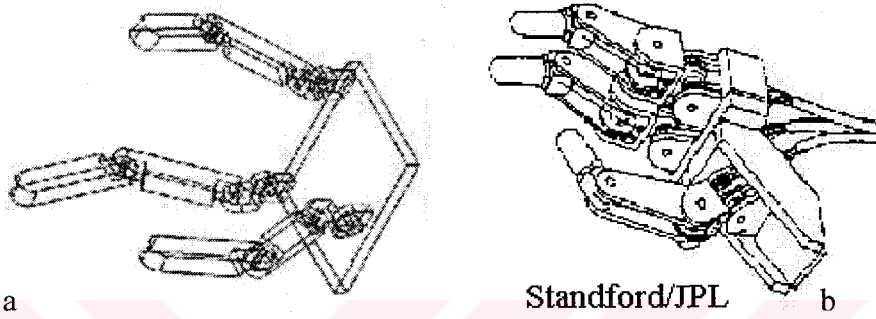


Şekil 4.9.a Esnek tip robot el tasarımı b.Silindirik tip robot el tasarımı [28]

Robot el üzerindeki parmakların serbestlik dereceleri parmaklara daha fazla eklem ekleyerek artırılabilir. Fakat parmak üzerine eklenen her bir fazla eklem için ayrı bir hareketlendirici sistem gerekecektir. Bu sistem parmakların hemen gerisinde olabileceğı gibi mekanik işleyici gerisinde de olabilir. Eklem sayısının artmasıyla birlikte hareket iletimi ve hareket kontrolü zorlukları bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

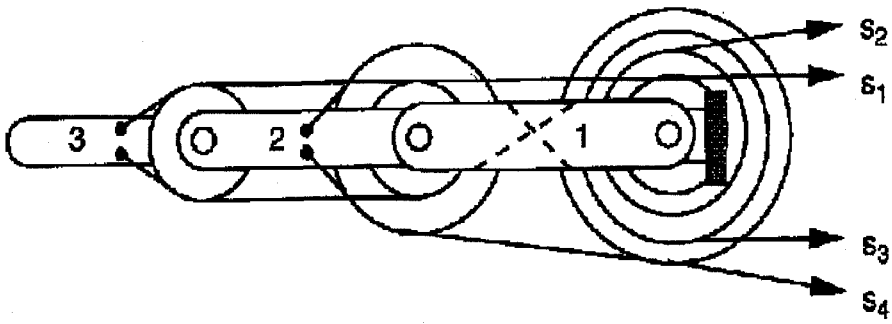
Şekil 4.9.b’de gösterilen silindirik tip robot el, esnek tip robot el üzerindeki yatay eksenleri birleştirilip her parmakta düşey eksenli bir eklem olacak şekilde tasarlanarak oluşturulmuştur. Silindirik geometrik şekillerdeki parçaların kavranmasında etkili bir tasarımıdır.

Parmakların yan yüzeylerinin kullanıldığı robot elin (Şekil 4.10a) en büyük avantajı aynı yönde bulunan iki parmak arasında da kavrama gerçekleştirilebilmesidir. JPL/Stanford Robot El bu tipte tasarlanmış bir robot eldir (Şekil 4.10b).



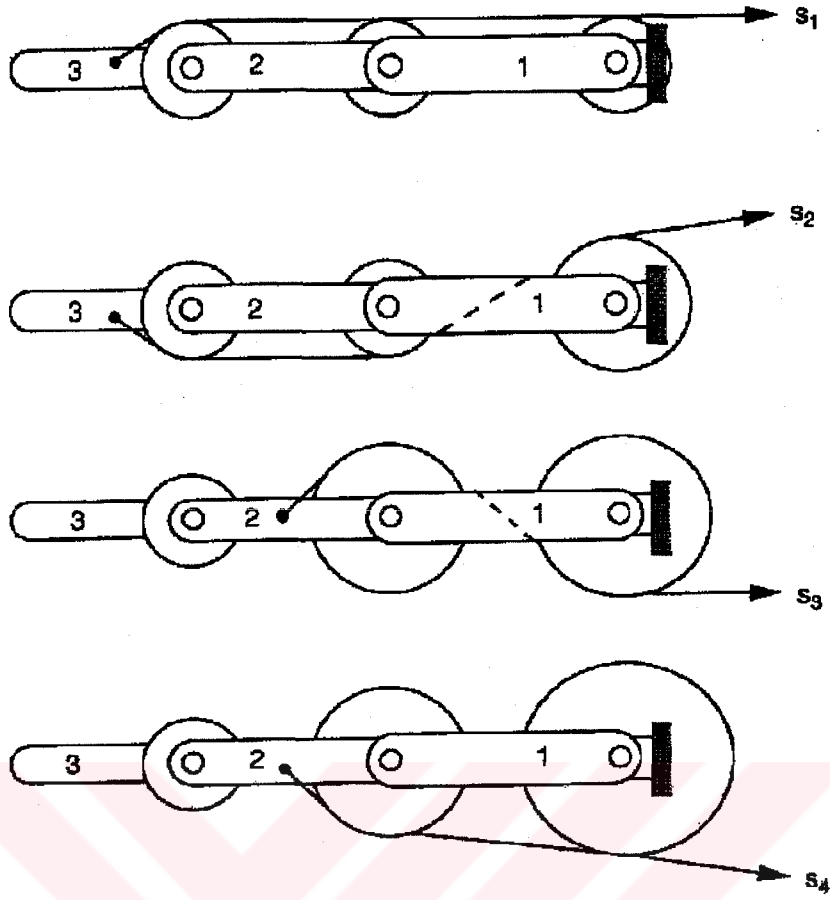
Şekil 4.10 Parmak yan yüzeylerinin kullanıldığı robot el tasarımı ve Stanford/JPL Robot El [28,29]

Robot el sistemleri hareket iletim mekanizmaları büyük oranda makara-ip sistemleri kullanarak çözülmektedir. JPL/Stanford Robot El, her parmağı üç serbestlik derecesine ve dört adet elektrik motoruna sahiptir. Şekil 4.11’de üzerinde iki ayrı eklem için hareket iletimi ip-makara mekanizması tasarımı gösterilmektedir.



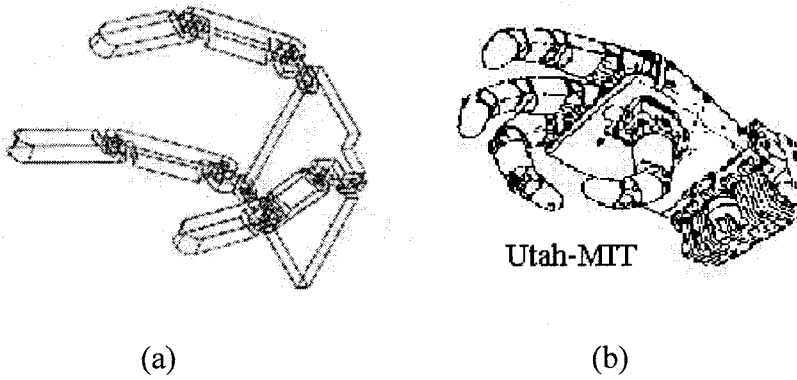
Şekil 4.11 Stanford/JPL Robot Elde Makara-ip mekanizması [30]

Burada üç numaralı eklem hareketi karşılıklı S1 ve S2 kablolarının hareketi ile iki numaralı eklem hareketi karşılıklı olarak S3 ve S4 kablolarının hareketi ile sağlanmaktadır (şekil 4.12). Bu mekanizmanın en büyük dezavantajı; parmaklarda dört ayrı kablonun gerilimini ayarlamak ve uzun süre aynı gerilimi koruma güçlüğüdür.



4.12 Makara-ip mekanizmasında hareket kontrolü [30]

Karşılıklı parmaklardan oluşan tip robot el insan eline en yakın özelliklere sahip robot eldir. Şekil 4.13a'da tasarımı görülen bu ele en iyi örnek UTAH-MIT robot eldir. Utah/MIT Robot El, biri baş parmak olmak üzere toplam dört parmakтан oluşmaktadır (Şekil 4.13b). Her parmakta dört eklem vardır. Parmaklara dört serbestlik derecesini kazandırmak için sekiz ayrı kablo bulunmaktadır. Bu kabloların bir ucu eklemlere diğer ucu ise pnömatik silindirlere takılmaktadır.



Şekil 4.13.a Karşılıklı parmaklardan oluşan tip robot el tasarımı b. Utah-MIT Robot Elin tasarımı [28]

4.3 Geleneksel Robot Hareketlendirici Düzenekleri

Robot ellerde eklemlerin hareketi için gerekli gücü üreten çeşitli teknolojilere dayalı tahrik düzenekleri vardır. En yaygın kullanılan hareketlendirici teknolojileri elektrik motorları, hidrolik hareketlendiriciler ve pnömatik hareketlendiricilerdir.

Hidrolik ve pnömatik hareketlendirici düzenekleri akışkanların hareket ettirilmesi ile çalışırlar. Hidrolik sistemlerde akışkan basınçlı yağ, pnömatik sistemlerde ise basınçlı havadır. Hidrolik tahrik düzenekleri büyük, yüksek performanslı, pahalı sistemlerde, pnömatik tahrik düzenekleri ise daha küçük performanslı robotlarda kullanılır.

Elektrik motorları robotikte oldukça fazla tercih edilen hareketlendirici elemanlarıdır. Bunun nedeni yeteneklerinin diğerlerine oranla fazla olmasıdır. Robotlarda kullanılan farklı tiplerde elektrik motorları vardır. En çok kullanılanlar; DC servomotor ve adım motorlarıdır. Adım motorları girişinden aldığı sayısal darbelere bağlı olarak, milinden belirli bir açıda dönme hareketi alınan motorlara denir.

Robot tasarımlarında öncelikle, mevcut sürücü mekanizmalarının hangisinin en uygun olduğuna karar verilmelidir. Ayrıca konumlama doğruluğu, güvenilirliği işlem hızı, fiyatı gibi faktörlerde bu seçimde değerlendirilmesi gereken konulardır. Elektrik motorları doğal olarak temiz olup doğru çalıştırıldıklarında yüksek güvenilirlikli konumlama sağlayabilirler. Bunun tersine hidrolik motorlar için basınçlı yağ kullanımı gereklidir. Pnömatik sürücüler döngüsel yol işlemlerinde yüksek doğruluklu konumlama sağlayamazlar [25].

Hidrolik sürücüler elektrik motorlarına göre küçük bir hacimde büyük güç verebilirler. Basınçlı yağ, basit motorlara verilerek aşırı yüksek burulma (tork) ve hızlı işlem sağlanabilir. Aynı zamanda elektrohidrolik bir valfi kontrol etmek için gerekli olan güç küçüktür. Esas olarak iş, yağı sıkıştırırken ve bunu robot kollarındaki motorlara iletirken yapılır. Robotun tabanında veya başka uzak bir yerde yerleştirilmiş olan hidrolik pompa için gerekli olan tüm güç, güçlü ve verimli bir elektrik motoru tarafından sağlanabilir. Güç, küçük elektrohidrolik valfler ile kontrol edilir. Buna rağmen yüksek doğruluklu küçük elektrohidrolik valfler , güçlü elektrik yükselteçleri ve kontrolörlerine göre daha pahalı ve daha az güvenilirdir [25].

Kısaca, hidrolik sürücüler yüksek burulma momentlerinde hızlı hareket beklenildiği durumlarda, yüksek güç ihtiyaçlarının fazla olduğu, azda olsa yağ kaçağının kabul

edilebileceği yerlerde kullanılır. Pnömatik hareketlendirici sistemleri 5-10 Mpa basınçlarda çalışırken, hidrolik hareketlendirici sistemleri 300 Mpa ve daha üstü sıvı basınçlarında yüksek güçle çalışabilmektedir. Elektrik sürücüler daha düşük güçler için ve patlayıcı malzemelerin ateşlenme tehlikesinin olmadığı yerlerde tercih edilir. Elektrik motorlarda güç/ağırlık oranı düşüktür. Buna rağmen kolay taşınabilirler, ihtiyaç duyduğu elektrik gücünü kolaylıkla elde edebilirler ve kolay çalışırlar [25].

Pnömatik sistemler; bütün sistemler içinde eğer uygulama için yeterli özellikleri sağlıyorsa büyük olasılıkla en ucuz sistemlerdir. Gazların sıvılara göre sıkıştırılabilmesi göz önüne alındığında, pnömatik sistemlerin kontrol uyarılarına verdikleri tepki hidrolik sisteme göre yaklaşık 4 kat daha yavaştır. Hidrolik yağlar pnömatik sistemde kullanılan havaya göre daha az akışkan olduğu için, hidrolik sistemler sönümleyici olarak kullanılabilirler. Hidrolik sistemlerde kullanılan yağın düzenli bir şekilde temizlenmesi ve filtre edilmesi gerekir. Aksi takdirde çok küçük parçalar bile sistemde kilitlenme yaratabilir [29].

Şu an kullanılan robotlardan yarısına yakın kısmı elektrik motor hareketlendirici sistemleri ile yönetilmektedir. En büyük avantajı; hız kontrolünün sıfırdan istenilen motor hızına kadar, uygulanan voltajı basitçe ayarlayarak kontrol edilebilir olmasıdır. Bu kontrol yetenekleri istenen bir hareketi sağlamakta, çok değişik yüklemelere rağmen kullanılabilir. Elektrik motor sistemlerinin bu yönü pnömatik ve hidrolik sistem hareketlendiricilerine göre önemli bir avantajdır.

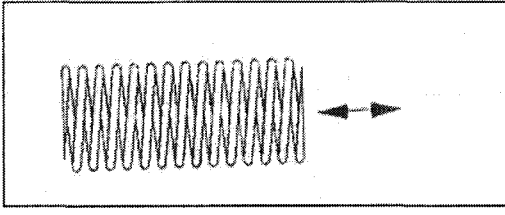
Sonuçta her üç sisteminde kendi içinde ayrı ayrı avantajları vardır. Pnömatik hareketlendiriciler doğal basitlikleri, hidrolik hareketlendiriciler güçleri ve elektrik hareketlendiriciler iyileştirilmiş kontrol kapasiteleri ve temizlikleri ile seçilebilirler.

4.4 Şekil Bellekli Alaşımların Robotik Uygulamaları

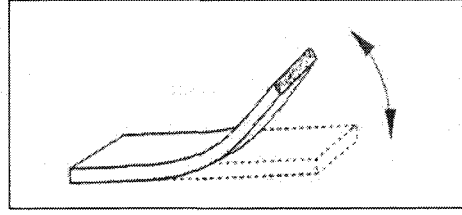
Robotik uygulamalarında şekil bellekli alaşımlar büyük oranda levha, yay ve tel şeklinde kullanılmıştır. Geliştirilen hareketlendirici sistemlerini dört gruba ayırmak mümkündür. Bunlar ;

- a. Karşılıklı olarak iki şekil bellekli yayın kullanılması
- b. Bir çelik yay ve bir şekil bellekli yayın karşılıklı olarak kullanılması
- c. Şekil bellekli alaşım tellerin kullanılması

d. Şekil bellekli alaşım levhaların kullanılması şeklinde sıralanabilir.



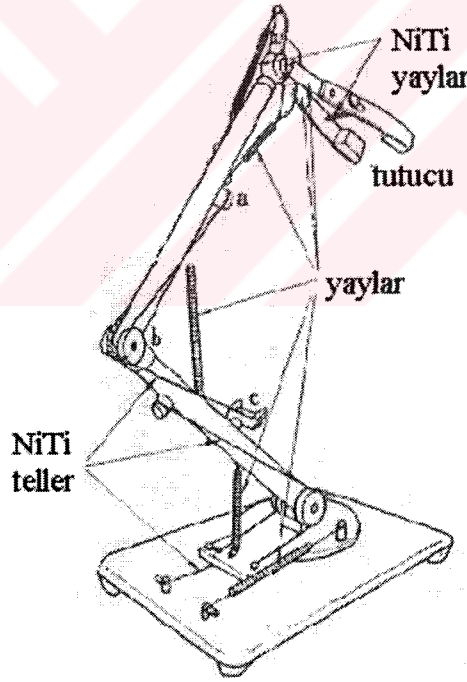
(a)



(b)

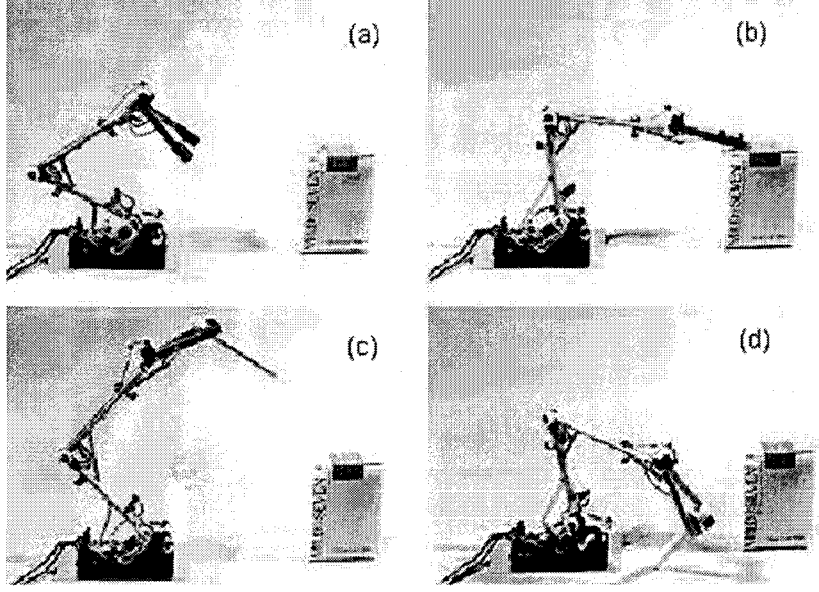
Şekil 4.14.a Şekil bellekli alaşım yay b. Şekil bellekli alaşım levha

NiTi tel ve yaylar kullanılarak geliştirilen, 16 cm. yüksekliğinde, 0.06 kg. ağırlığında ve beş serbest dereceli prototip mikro robot Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Elektrik akım darbeleri ile kontrol edilen mikro robot, karşısına bırakılan bir cisme dirseklerde bulunan yaylar ve NiTi teller sayesinde yaklaşmakta ve tutucu kısmında bulunan NiTi yay vasıtasıyla sıkıştırma ve bırakma işlemini gerçekleştirmektedir.



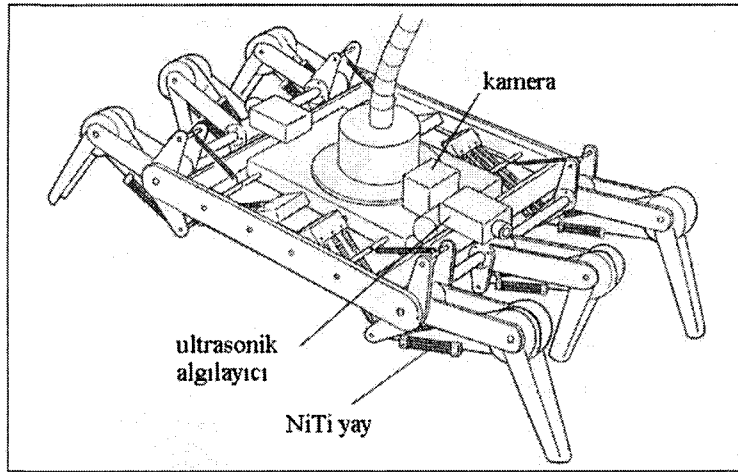
Şekil 4.15 NiTi alaşımların hareketlendirici olarak kullanıldığı mikro robot [17]

Şekil 4.15’de gösterilen mikro robotun hareket alanında yaptığı uygulamalar (içi su dolu kağıt bir kupaya yönelmesi, kupayı mikro tutucusu ile tutması ve bırakması hareketleri) Şekil 4.16’da gösterilmektedir.



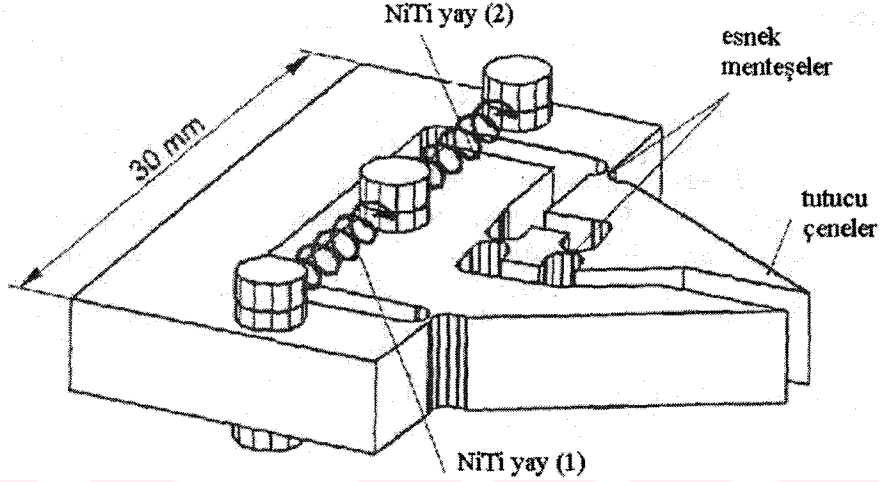
Şekil 4.16 Şekil bellekli alaşımların kullanıldığı mikro robotun hareketi [17]

Sualtı çalışmalarında ve jeolojik araştırmalarda kullanılabilecek şekilde tasarlanan insansız robotik sistemlerinden biride NiTi şekil bellekli alaşım yayların kullanıldığı altı bacaklı robotik yengeçtir (Şekil 4.17). Elektrik motor veya hidrolik hareketlendirici sistemlerinin kullanıldığı geleneksel sualtı sistemlerinde, deniz suyu kaçaklarına karşı sistemi korumak ve deniz suyundan izole etmek gerekir. NiTi şekil bellekli alaşımları yüksek korozyon direnci sayesinde korumaya almaya gerek bulunmamaktadır. Elektrik akımı ile ısıtma deniz suyunun yardımıyla soğutmanın gerçekleştiği hareketlendirici sisteminde soğumanın hızlı olması hareket periyodunu hızlandırmaktadır.



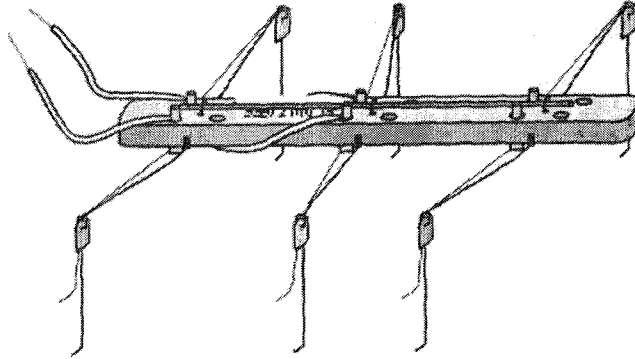
Şekil 4.17 NiTi yayların kullanıldığı altı bacaklı robotik yengeç [19]

Şekil 4.18’de gösterilen mikro tutucu tasarımında ise NiTi yaylar karşılıklı olarak kullanılmıştır. Birinci yay üzerinden elektrik akımı geçirilerek kritik sıcaklık üzerine çıkarıldığında tutucu kapanmakta, elektrik akımı ikinci yaydan geçirildiğinde ise tutucu açılmaktadır.



Şekil 4.18 NiTi yaylar kullanılan mikro tutucu [12]

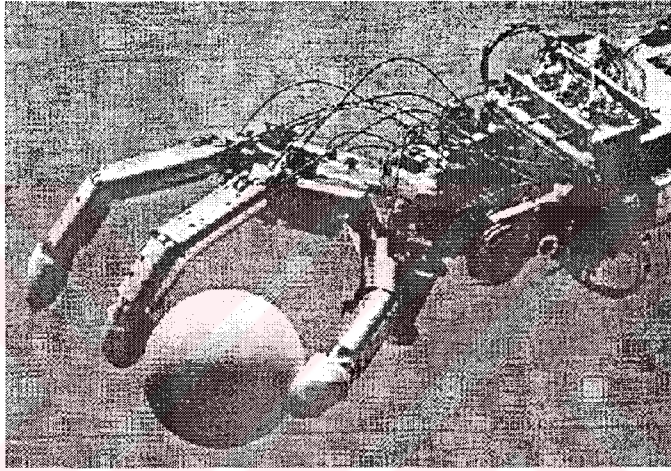
NiTi teller kullanılarak gerçekleştirilen altı bacaklı Squito robot böcek robotik uygulamaların farklı bir tasarımıdır (Şekil 4.19). Böcek üzerinde altı bacağın her birini kontrol eden NiTi teller üzerinden, birbirini takip eden zamanlarda periyodik olarak elektrik akımı geçirildiğinde robot böcek ilerlemeye başlamaktadır.



Şekil 4.19 NiTi teller kullanılarak tasarlanan Squito robot böcek [31]

Şekil bellekli alaşım kullanılarak insan eli benzeri biyomekanik robot el tasarımlarından mikro tutucu tasarımlarına kadar patenti alınmış çok sayıda robot el bulunmaktadır. Bu tasarımlar arasında en tanınmış olanı Hitachi Ltd. tarafından geliştirilen Hitachi Robot Eldir (Şekil 4.20). Dört parmaklı robot el olan Hitachi robot el, üzerinde 0.02 – 0.035 mm. çaplarında NiTi teller kullanılmıştır. Her parmak

içerisinden dört farklı NiTi tel geçmektedir. Devre kapandığında parmaklar içindeki tellerin ısınması ile hareket sağlanmakta, devre açıldığında ise NiTi tellerin soğumasıyla parmaklar açılmaktadır. Şekil bellekli alaşım kullanılan robot el uygulamalarında kavrama alt sistemi alaşım üzerinden elektrik akımı geçirilerek kritik sıcaklık üzerine çıkarılmasıyla kolaylıkla sağlanmaktadır. Fakat alaşımın kritik sıcaklık altına kendiliğinden soğuması çok yavaş geliştiğinden parmakların açılmasına yönelik ters yöndeki hareket düşük hızda sağlanabilmektedir. Parmaklardaki soğuma hızını, dolayısıyla hareket hızını, artırmak için yüzey alanı geniş şerit şeklinde NiTi alaşımı kullanıldığında, parmakların hareket hızında % 20 oranında bir artış görülmüştür.



Şekil 4.20 NiTi teller kullanılarak geliştirilen Hitachi robot el [18]

Hareketlendirici teknolojileri ve bunların güç/ağırlık oranları arasında bir karşılaştırma yapıldığında hareketlendiricinin en hafif olması güç ağırlık oranının da en yüksek olması istenilen bir özelliktir. Nikel-Titanyum alaşımının güç/ağırlık oranının yüksek olması, düşük ağırlıkta bir tutucu ile tutma işleminin daha yüksek kuvvetle yapılmasını sağlamaktadır.

Sistemin zayıf noktalarından bir tanesi tekrar ömrü (yorulma problemi)'dür. Tekrar ömrü alaşımın özelliğine ve istenilen şekil bellek değişimi oranına göre değişmektedir. Mf ve Af sıcaklık noktalarının düşük olduğu alaşımlarda tekrar ömrü daha yüksek olmaktadır. Nikel-Titanyum alaşımı ile yapılan deneylerde 10.000 tekrar yapıldığında hareket kabiliyeti %2 civarında olmaktadır. 1.000.000 dan fazla tekrar yapıldığında şekil bellek kabiliyetinin %1'e kadar düştüğü görülmüştür [32].

4.5 Şekil Bellekli Alaşım Hareketlendiriciler İçin Kontrol Sistemleri

Şekil bellekli alaşımlar bir hareketlendirici olarak kullanılması durumunda yapılan görevin kontrolünün ve geri besleme sisteminin sağlanması , hareketlendiricinin iş yapabilme kabiliyetini artıracaktır. Örneğin eğer bir parçanın tutulması isteniyorsa ne gevşek tutup parçanın düşmesine ne de fazla sıkıp parçanın zarar görmesine olanak verilmeyecektir.

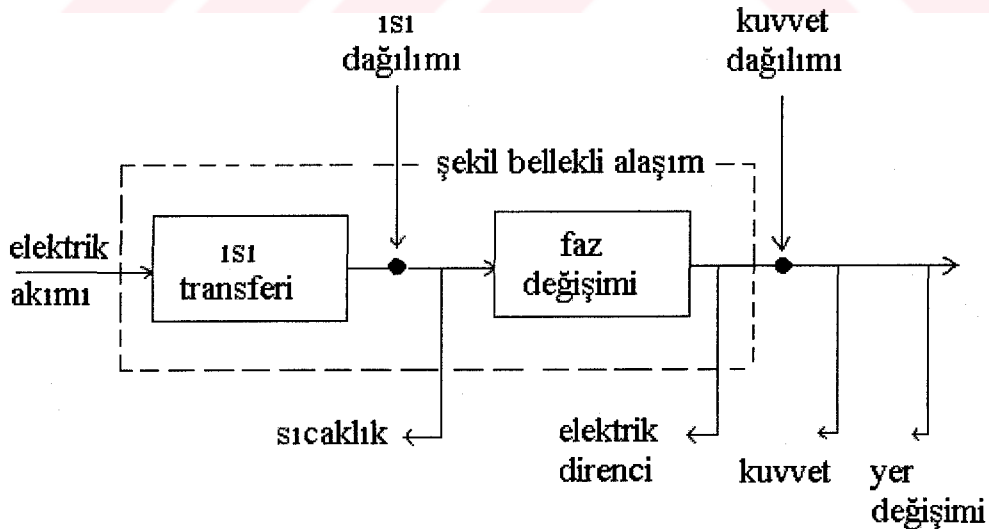
Şekil bellekli alaşımlar için geri besleme oluşturabilecek kontrol değişkenleri iç ve dış kontrol değişkenleri olarak iki gruba ayrılabilir. İç kontrol değişkenleri alaşımın iç yapısında oluşan değişim sonucu elde edilebilen verilerden, dış kontrol değişkenleri ise alaşımın dış yapısında şekil değişimi anındaki verilerden oluşur (Şekil 4.21).

İç kontrol değişkenleri :

- a- Sıcaklık
- b- Elektrik direnci

Dış kontrol değişkenleri :

- a- Kuvvet
- b- Yer değişimi



Şekil 4.21 Şekil bellekli alaşım kontrol değişkenleri

İç kontrol değişkenlerinden alaşımın sıcaklığı; alaşım üzerine konulabilecek bir sıcaklık algılayıcı ile ölçülebilir. Isınma veya soğuma sonucu alaşımın martenzit

fazdan ostenit faza veya ostenit fazdan martenzit faza faz dönüşümlerinin (alaşımdaki şekil değişikliğinin) ölçülen sıcaklık derecelerinde ne kadar olduğu belirlenerek kontrol sistemi için bir veri oluşturması sağlanabilir.

Alaşımın ostenit ve martenzit fazlarda öz direnç değişimi yine bir iç kontrol değişkeni olarak kullanılabilir. Üçüncü bölümde Şekil 3.5’de Ni-Ti alaşımasının faz değişimi anında öz direncindeki artma/ azalma gösterilmektedir.

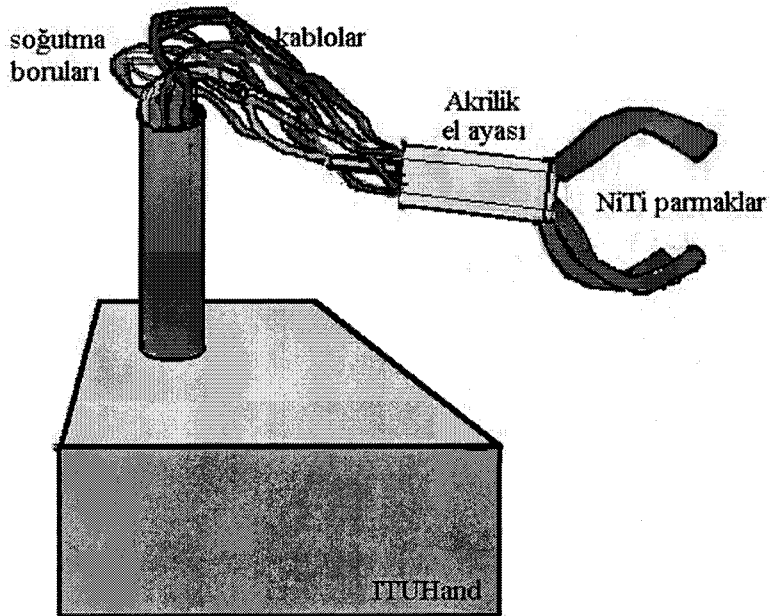
Dış kontrol değişkenlerinden kuvvet, alaşımanın şekil değişimi esnasında kavrayacağı parçaya uygulamakta olduğu basınç sonucu ortaya çıkar. Burada parça üzerine uygulanan basıncın ne kadar olduğunun bulunması ile uygulanan kuvvet tespit edilir. Oluşan basıncın bir kontrol değişkeni olarak alınması ile parçanın istenilen ölçüde kavranması kontrol edilebilir. Birçok robot uygulamalarında yer değişimi yani uç etkileyicinin hareketi sonucu koordinatlarının değişmesi bir kontrol değişkeni olarak alınarak, bilgisayarla kontrol sağlanmaktadır.



5. İTÜ ROBOT ELİN TASARIMI VE KULLANILAN SİSTEMLER

5.1. İTÜ Robot Elin Tasarımı

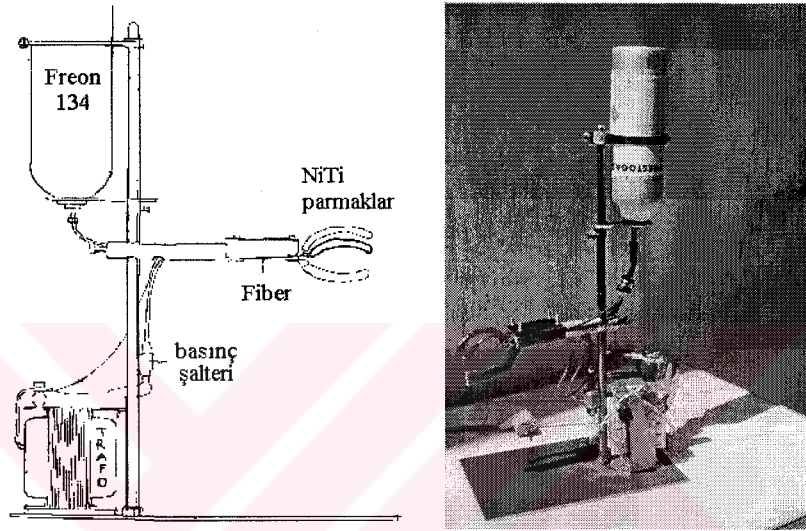
Bu çalışmada önceden yapmış olduğumuz SMA Robot Elin [33] dizaynı ve çalışma sistemlerindeki sorunları gidermek üzere yeni bir el prototipi tasarlanmıştır. SMA Robot Elin soğutma sisteminde kullanılan freon 134 gazının ($C_2H_2F_4$) ekonomik olmaması nedeniyle yeni tasarımda soğutma sıvısı ile soğutma sistemi geliştirilmiştir. SMA Robot El parmaklarında kullanılan NiTi levhaların kalınlığı nedeniyle (75x5x2 mm.) uzun sürede ısınma sorunu İTÜ Robot Elde parmak boyutları 75x2x2 mm.'ye indirilerek çözülmüştür. Uygun kavramanın sağlanması için SMA Robot Elden farklı olarak parmak diplerine yerleştirilen bakır pabuçlarla parmak açıları ayarlanabilir hale getirilmiştir. Yapılan bu değişiklikler yeni tasarımın oluşmasını sağlamıştır. Ayrıca, İTÜ Robot El, NiTi şekil bellekli alaşım levha ile hareketi sağlanan bir kola bağlanarak hareket yeteneği artırılmıştır.



Şekil 5.1 İTÜ Robot El Tasarımı

Patlamamış mühimmat ve tuzaklanmış sistemler gibi risk taşıyan bölgelerde görev yapacak robot sistemlerinin hafif, ekonomik ve basit çalışma prensibine sahip olması, oluşturulacak prototip çalışmada her zaman istenilen özelliklerdir. İTÜ Robot El tasarımı bu özellikler dikkate alınarak geliştirilmiştir.

Daha önce gerçekleştirdiğimiz SMA Robot El ile yeni prototipimiz İTÜ Robot Elin ortak özelliği her ikisinde de hareketlendirici olarak NiTi şekil bellekli alaşımlar kullanılmasıdır.



Şekil 5.2 SMA Robot El tasarımı ve prototipi [34]

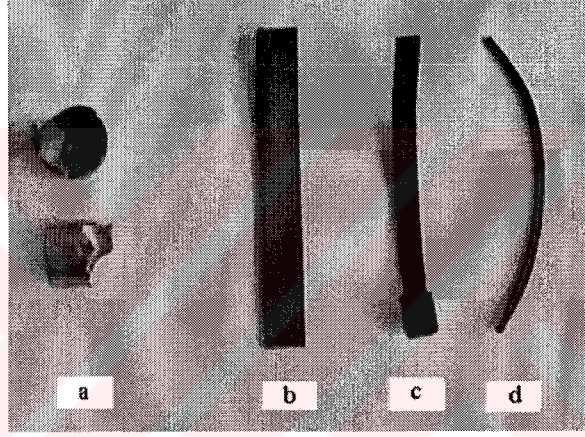
İTÜ Robot El sisteminin en büyük avantajı, sistemin basit ve ekonomik olmasıdır. Sistemin gürültü yapmadan, çevreyi kirletmeden çalışması diğer bir avantajıdır. Sistemi 3 veya 12 volt gibi düşük voltajlarda kullanma kolaylığı vardır. Robot elin parmak kavrama ve bırakma hareketleri özel görevler için kolaylıkla değiştirilebilmektedir.

5.1. İTÜ Robot Elde Kullanılan Sistem ve Malzemeler

İTÜ Robot El dört ana alt sistemden oluşmaktadır. Birbirini tamamlayan sistemler :

- Parmaklar ve kol sistemi
- Isıtma sistemi
- Soğutma sistemi
- Kontrol sistemidir.

Parmaklar ve kolda hareketlendirici olarak levha halinde iki farklı NiTi şekil bellekli alaşım kullanılmıştır. Bunlardan birincisi ABD.den Shape Memory Application Inc. Firmasından 75x25x2 mm. boyutlarında levhalar halinde ithal edilmiştir (Şekil 5.3b). Levhalar tel erozyon yöntemiyle 75x2x2 mm. boyutlarında parçalara ayrılmıştır (Şekil 5.3d). Şekil 5.3c’de ise SMA Robot Elde kullanılan 75x5x2 mm. NiTi levha görülmektedir. İkinci çeşit NiTi şekil bellekli alaşım tarafımızdan argon gazı altında vakumlu indüksiyon fırınında üretilmiştir (Şekil 5.3a). İthal edilen NiTi alaşım ile üretimini gerçekleştirdiğimiz NiTi levhaların TUBİTAK-MAM’da Perkin Elmer Pyris 1 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre cihazında, azot atmosferi altında, biri 5 diğeri 10°C/dak. ısıtma hızı uygulanarak yapılan DSC analizlerinde faz dönüşüm sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu görülmektedir (Ek B,C Tablo 5.1).



Şekil 5.3 NiTi döküm ve levhalar

Tablo 5.1 İthal edilen ve ürettiğimiz NiTi levhaların DSC analizine göre faz dönüşüm sıcaklıkları

Malzeme	Mf	Ms	As	Af
İthal Edilen NiTi	35 °C	67 °C	84 °C	98 °C
Ürettiğimiz NiTi	46 °C	77 °C	81 °C	106 °C

İthal edilen NiTi levhalar robot elde parmaklarda, ürettiğimiz NiTi alaşım ise kolda hareketlendirici olarak kullanılmıştır. Parmakların dış yüzeylerinde hem elektrik hem de ısı yalıtımı maksadıyla silikon izolatörlerden yararlanılmıştır. Parmaklar kolay işlenebilirliği, elektrik ve ısıya karşı yalıtkanlığı nedeniyle akrilik levhadan (plexiglass) yapılan el ayasına monte edilmiştir.

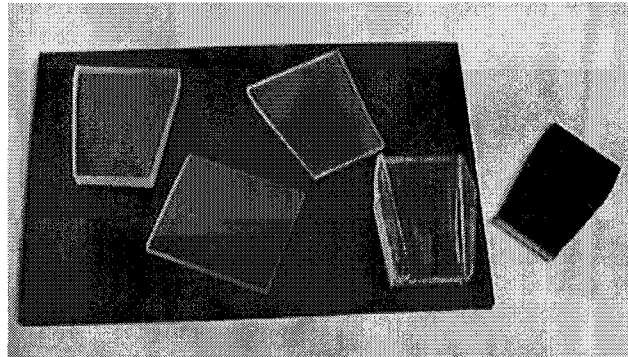
Parmakların kapanması ve kolun kaldırılmasında kullanılan ısıtma işlemi 300 watt gücünde (3 V., 100 A.) transformatörle sağlanmaktadır. 300 watt güç, öz direncinin yüksekliği nedeniyle NiTi levhaların hızlı ısınmasını sağlamakta ve faz dönüşümü ile birlikte parmaklarda kavrama, kolda kaldırma hareketini oluşturmaktadır. Parmaklara elektrik iletiminde yanmaz silikon kaplı kablolar ile pirinç borular kullanılmıştır.

Kapalı devre ile çalışan soğutma sisteminde parmaklar üzerinden geçirilen soğutma sıvısı NiTi levhaların soğumasını hızlandırarak parmakların daha hızlı açılmasına yardımcı olmaktadır. Soğutma sıvısı su pompası vasıtasıyla sistemin altındaki depodan kılcal, yumuşak plastik borularla parmaklar üzerine pompalanmakta ve devir-daim yaptırılmaktadır.

Basınç şalteri ve buna bağlı silikon borulardan oluşan kontrol sisteminde; üst parmak içerisine yerleştirilen hidrolik fren yağı doldurulmuş balon, algılayıcı görevi yapmaktadır. Parmaklarda kavrama hareketi ile birlikte üst parmak üzerinde bulunan balondaki sıvı sıkışarak şalter üzerine basınç uygulamakta, bunun sonucu olarak elektrik devresi açılarak ısıtma işlemi durdurulmaktadır. Böylece parmaklar arasındaki malzeme istenilen basınçta kavratılmaktadır. Kavrama süresi uzadığı takdirde kendiliğinden soğuma, parmaklarda açılmaya neden olmaktadır. Bu durumda basıncın azalması ile şalter devreye girerek elektrik devresini kapatıp malzeme üzerine uygulanan basıncın belli seviyede kalmasını sağlamaktadır.

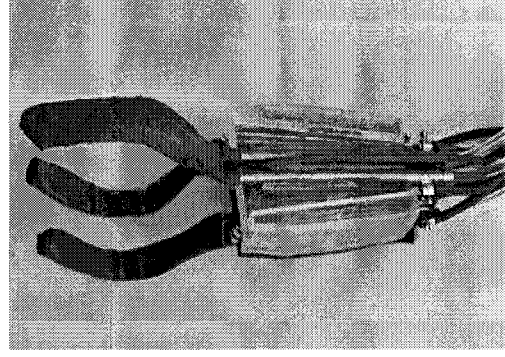
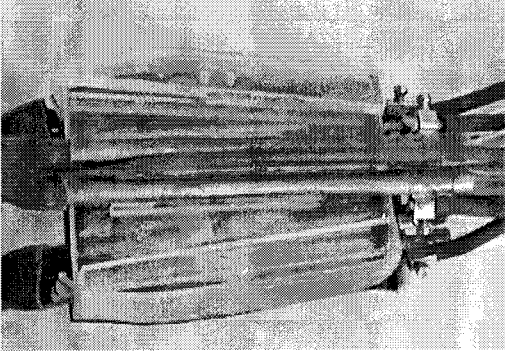
5.3 İTÜ Robot El Prototipinde Takip Edilen Çalışma Aşamaları

- Saydam akrilik levha kullanılarak el ayası oluşturulması (Şekil 5.4),



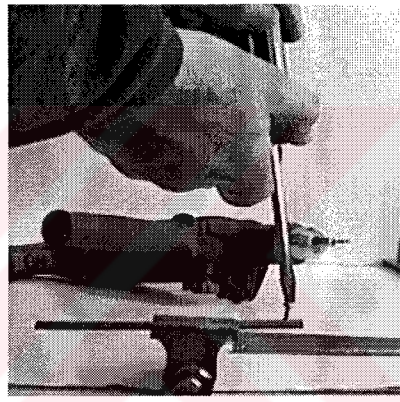
Şekil 5.4 İTÜ Robot El ayasında kullanılan saydam akrilik levhalar

- El ayası üzerinde parmaklara gidecek kanalların açılması (Şekil 5.5),



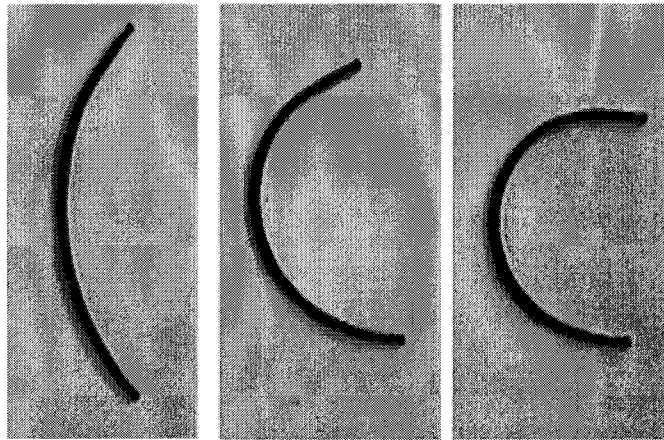
Şekil 5.5 El ayası üzerine kanalların açılması ve parmak bağlantıları yerleştirilmesi

- 6 mm. çapında pirinç boruların 11 cm. uzunluğunda kesilmesi, kablo bağlantısı için üzerine klemens lehimlenmesi, NiTi levhaların tutturulması için kılavuzlu delik açılması (Şekil 5.6),



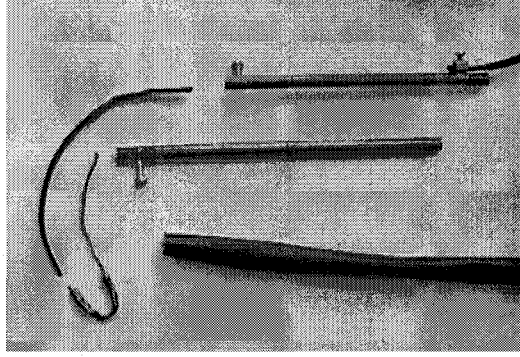
Şekil 5.6 Robot el parmak bağlantı borularına delik delip kılavuz açma

- NiTi parmaklara yükleme ve Af sıcaklığı üzerine ısıtma yöntemiyle çift yönlü şekil bellek özelliğinin verilmesi (Şekil 5.7),



Şekil 5.7 Ni-Ti parmaklara kazandırılan kavrama hareketleri

- 3 mm. apında bakır boruların 3.2 cm. uzunluklarında kesilerek U şekline getirilmesi ve Ni-Ti parmakların ucuna montesinin yapılması (ekil 5.8),



Şekil 5.8 Robot elde parmak ucu ve parmak dibinde kullanılan malzemeler

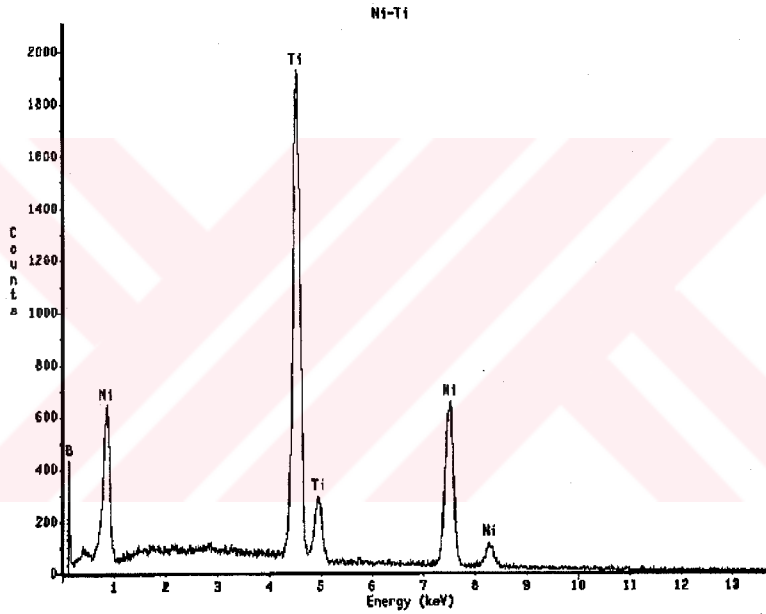
- Parmak ucundaki U şeklindeki bakır borunun diğ er ucuna, parmak dibinden gelen kablounun Ni-Ti parmaklar uzunluğunda kesilerek lehimlenmesi,
- NiTi parmak diplerinin bakır boru (2 mm. apında, 3 cm. uzunluğunda) içerisine sabitlenerek parmak dibi aıların vermesi,
- NiTi parmak diplerinin pirinç borular ucuna vidalanması,
- Parmak diplerine soğutma sıvısının akışını sağlayacak plastik hortumların geçirilmesi ,
- Basınç algılayıcı baloun üst parmak içerisine yerleştirilmesi ve silikonla sıvanması,
- Diğ er parmaklar üzerine silikon izolatörün geçirilmesi
- El ayası kanal kapaklarının kapatılarak vidalanması.
- Tamamlanan elin kola montesi ve kolun robot el kaidesine bağlanması.

Bütün bu işlemlerden sonra robot elin ısıtma, soğutma ve kontrol sistemleri gözden geçirildiğinde İT  Robot Elin tasarlanan hareketleri başarıyla yaptığı görülmüştür (Ek A). Böylece robot el üzerinde NiTi parmaklar üzerinden elektrik akımı geçirildiğinde ısınma sonucu parmaklar kapanarak kavrama hareketini yapmakta, bu durum basınç şalteri ile kontrol altında tutulmaktadır. Parmakların açılması istendiğinde soğutma sistemindeki pompa devreye sokularak parmaklar üzerinden soğutma sıvısı geçirilerek parmakların açılması sağlanmıştır. Robot kol üzerinde bulunan NiTi levhaya ayrı bir devre ile elektrik verilerek kol aşağı/yukarı hareket ettirilmiştir. İT  Robot Elin performans analizleri altıncı bölümde incelenmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE İTÜ ROBOT ELİN PERFORMANS ANALİZLERİ

6.1 Metalografik Analiz

NiTi alaşımı numunelere yapılan EDS (Energy Dispersive Spectrometry) nokta analizleri sonucu atomca ve ağırlıkça Tablo 6.1’deki sonuçlar elde edilmiştir.



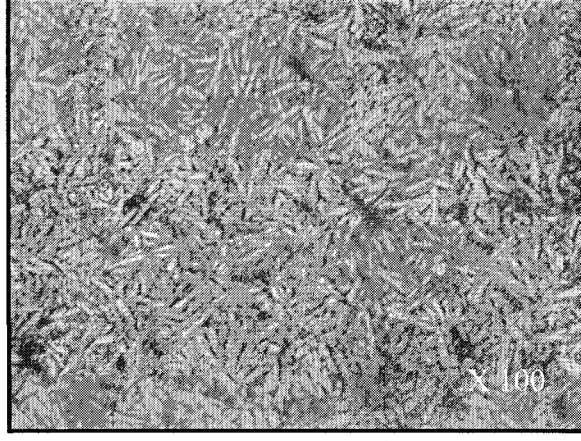
Şekil 6.1 NiTi numunelerden alınan EDS analizi

Tablo 6.1 NiTi numunelerden alınan EDS analizi sonucu elde edilen bileşim

Metal	%, Atomca	% Ağırlıkça
Ti	51.02	45.94
Ni	48.98	54.06

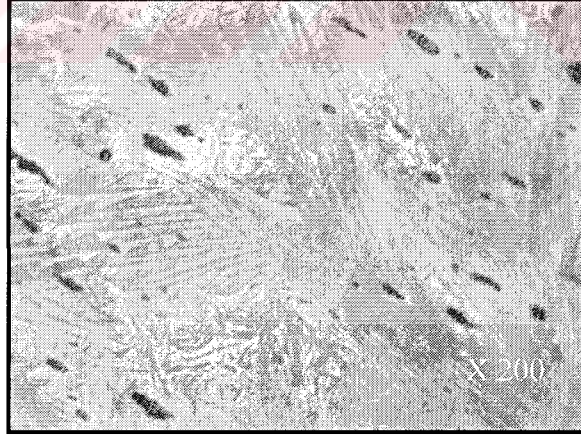
Işık metal mikroskobu ile İTÜ Robot El üzerinde kullanılan NiTi levhalardaki mikro yapıyı görmek üzere iki ayrı numune alınmıştır. Numuneler, metalografik etüd için

60-180-220-320 ve 600 numaralı SiC zımpara kağıtları ile zımparalandıktan sonra elmas pasta ile parlatılmıştır. Numune için kullanılan dağlama ayıracı eşit oranlarda (1:1:1) HF, HNO₃ ve asetik asit dağlama ayıracıdır. Alınan numunelerin mikro yapı görüntülerinde Şekil 6.2’de % 100 martenzit ikizleri görülmektedir.



Şekil 6.2 NiTi levhadan alınan numunenin mikro yapısı

Şekil 6.3’de ise çok kaba ve geniş boyutta martenzit ikizleri görülmektedir. Bu numunede görülen siyah leke gibi görüntüler TiNi₃ çökeltileridir. Çökeltilerin yönlenmiş olması numunenin tel çekme işleminden geçmiş olmasından kaynaklanmaktadır.



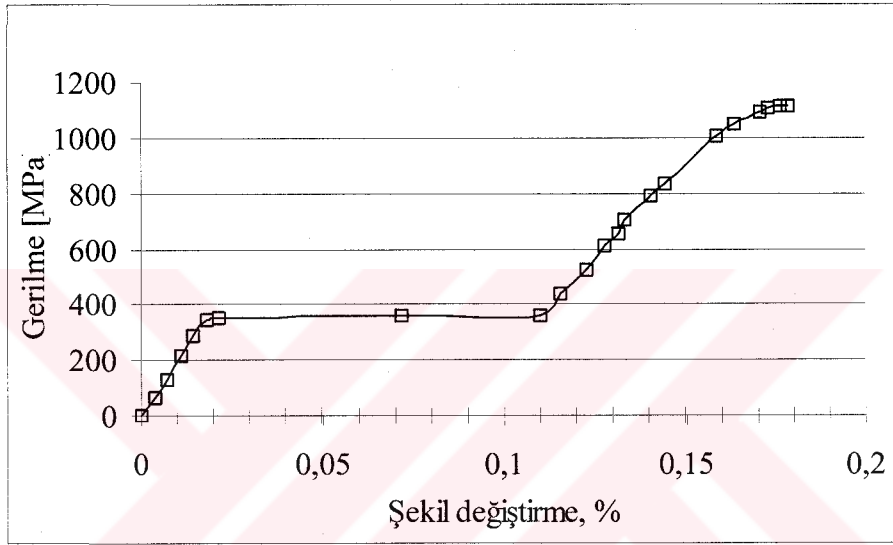
Şekil 6.3 NiTi telden alınan numunenin mikro yapısı

6.2 NiTi Numunelerin Çekme Deneyi

Çekme deneyi için 28 mm. boyunda ve (0.4mm x 0.56mm.) kesitinde NiTi tel numuneler kullanılmıştır. Instron Universal T 1195 cihazı kullanılarak yapılan çekme deneylerinde çene hızı 0.5 mm./dk., kağıt hızı 10 mm./dk. olarak kullanılmıştır.

Çekme deneyine tabi tutulan numune, çok ince kesitli olduğu için çene hızı, numune şekil değiştirme hızı olarak alınmıştır. Kuvvet ve yer değişimi; test cihazına bağlı plotter çıktısı olan milimetrik kağıttan okunmuştur.

340 Mpa'a kadar elastik olarak şekil değiştirmiş olup, bu gerilme değerinde martenzitik dönüşüm başlar. % 11 oranında şekil değiştirme değerinde dönüşüm tamamlanır. Bundan sonraki yükleme, ikizlenmelerin gerilme doğrultusunda yönlenmesi ve daha sonra plastik şekil değişimi ile sonuçlanır. % 18 oranında şekil değişimi ve 1112 Mpa gerilme değerlerinde numune kopmuştur.



Şekil 6.4 NiTi numunede $T > A_f$ için Gerilme-Şekil değiştirme diyagramı

İkinci durumda Şekil 6.5'de yapılan çekme deneyinde gerilme-şekil değiştirme diyagramında superelastik eğri görülmektedir. Burada malzemenin tümü martenzitik dönüşümü tamamladıktan sonra uygulanan kuvvet, sabit birim şekil değiştirme hızıyla azaltılmaya başlanmıştır. Şekil 6.5'de görüldüğü gibi gerilme değeri 350 Mpa'a ulaştığında martenzitik dönüşüm başlamıştır. Şekil değiştirme oranı % 10 oranına geldiğinde dönüşüm tamamlanmıştır. % 11 oranında birim şekil değiştirmeye kadar ise oluşan martenzitik varyantlar etkin varyant istikametinde yönelirler. Bundan sonraki aşamada yük boşaltımı sırasında % 10'a kadar elastik şekil değişimi görülmektedir. Devam eden yük boşaltımı esnasında ise ana faza dönüşüm başlamaktadır. % 1.8 oranındaki birim şekil değiştirmede dönüşüm tamamlanır. Bundan sonra yük sıfır değerine ulaşınca kadar elastik şekil değişimi devam eder.

6.3.2 İTÜ Robot Elde Kullanılan NiTi Parmakların Açılma Süresi

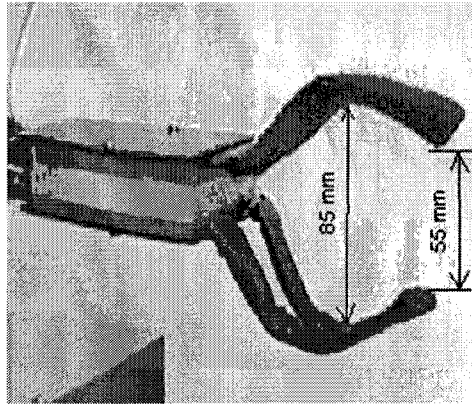
NiTi Parmakların açılma sürelerini saptamak üzere üç farklı ortamda deneyler yapılmıştır. Bu ortamlar freon gazı, 15 °C su ve 26 °C oda sıcaklığıdır. Yapılan deneylerin sonuçları Tablo 6.3’de gösterilmektedir.

Tablo 6.3. İTÜ Robot Elde farklı soğutma sistemlerinde NiTi parmakların (75x2x2 mm) tam açılma süreleri

Ortam	Tam açılma süresi
Freon gazı	2.2 saniye
15 °C su	3 saniye
26 °C oda sıcaklığı	137 saniye

6.3.3 İTÜ Robot Elin Kavrayabileceği En Büyük En Küçük Parça Boyutları

İTÜ Robot Elle kavranabilecek en küçük ve en büyük parça boyutlarının belirlenmesi için yapılan ölçümlerde prizmatik bir parçanın boyutları üç ayrı kartezyen düzlemde değiştirilerek ince kavrama ve güçlü kavrama sonucunda kavrayacağı en küçük ve en büyük malzeme boyutları bulunmuştur. Öncelikle robot elle ince kavrama ile yani parmak uç yüzeyleri kullanılarak yapılan kavramada en küçük kağıt inceliğinde bir parçadan, en büyük 55 mm. kalınlığındaki bir parçaya kadar tutma görülmüştür (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Parmaklarda kavranabilen en büyük parça boyutları

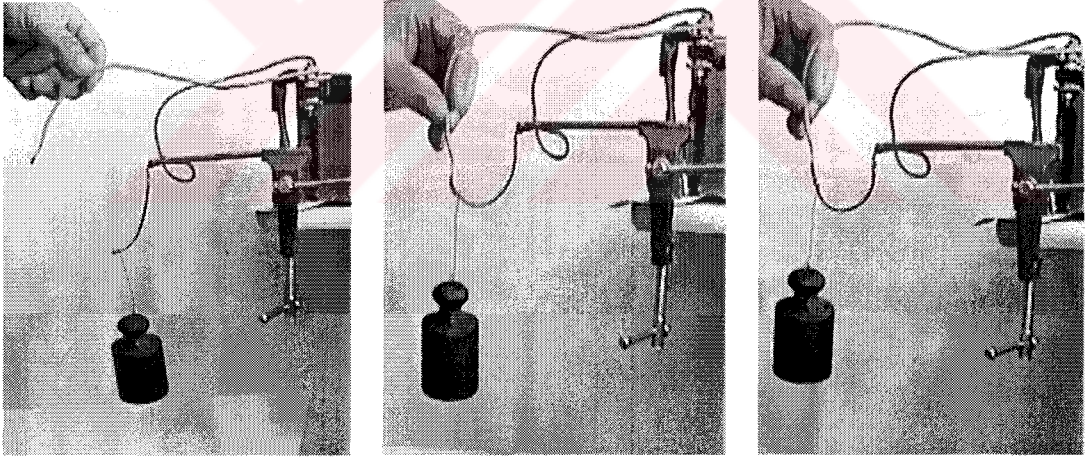
İTÜ Robot Elin şu andaki tasarımında parmak iç yüzeylerinin kullanılması, yani güçlü kavrama ile en küçük 24 mm. çapında silindirik parçayı kavrayabileceği tespit edilmiştir. Parça karşıdan alındığında robot elin tutabileceği en büyük parça boyutu

55 mm. olarak tespit edilmiştir. Robot el tamamen açıkken parmakların arasına 85 mm. çapında silindirik bir malzeme girebilmektedir.

İTÜ Robot Elde parmak diplerinde bulunan pabuç açıları değiştirildiğinde parmakların kapanma şekli ve kavrayabilecekleri malzeme boyutları da değişmektedir.

6.3.4 İTÜ Robot Elde Kullanılan NiTi Parmaklarla Kaldırılabilir En Büyük Parça Ağırlığı

Bu deney, 75x2x2mm. boyutlarında robot el parmaklarında kullanılan NiTi levha ile yapılmıştır. NiTi levhanın bir ucu sabitlenmiş, diğer ucuna düşey durumda ağırlık asılarak ölçümler yapılmıştır. 100 gram ağırlığından itibaren kaldırma ölçümlerine başlanmış, kaldırılan ağırlık üzerine 50'şer gram ağırlıklar eklenerek deney sürdürülmüştür. 1350 gramdan sonraki ağırlık eklemelerinde parmak kapanma şeklinde deformasyon meydana gelmiş, 2200 gramdan sonra yapılan deneylerde ise parmak ısıtıldığında ağırlıkları kaldıramadığı görülmüştür. Yapılan deneylerle ilgili çalışmalar Şekil 6.7'de gösterilmektedir.



Şekil 6.7 Parmaklarda kullanılan NiTi levhalarla yapılan kaldırma deneyi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Robot el tasarımlarında en uygun kavramayı sağlamak, endüstriyel robotun görev alanını genişletmek açısından önemli bir çalışma alanını oluşturmaktadır. Günümüzde artık endüstriyel robotların işletme içerisinde hemen her bölümde kullanıldığı düşünülürse, geleceğin işletmelerinin tamamıyla bilgisayarla bütünleşik üretim ve onun alt sistemlerinin modernizasyonu ile şekil alacağını görmek hiç de zor değildir. Artık yapılan çalışmalarda bir iş için en uygun robotun seçiminde robot sistem simülasyonu kullanılmaya başlanmıştır.

Robotik alanında şekil bellekli alaşımların kullanılması oldukça yenidir. Özellikle geleneksel hareketlendirici sistemlerinin dışında şekil bellekli alaşımları da robotik alanında kullanmak bu alanda yapılacak çalışmalara bir başlangıç oluşturması bakımından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, şekil bellekli alaşımların robot uç etkileyicisi kısmında, hünarlı bir robot el tasarımlarında etkin bir şekilde kullanılabileceği kanıtlanmıştır. Şekil bellekli alaşımlar kullanılarak gerçekleştirilen İTÜ Robot El prototipinin geliştirilerek, endüstriyel alanda montaj hattında esnek bir şekilde kullanılacağı ve robot elle kavrama sistemine yeni bir bakış açısı getireceği değerlendirilmektedir. Diğer robot el sistemleriyle karşılaştırıldığında parmaklarda kullanılan NiTi alaşımlarının insan eli kas yapısına benzer davranışlar göstermesi, daha etkin ve güçlü bir kavrama sağlaması ve yapılan tekrarlarda hata oranının düşük olması İTÜ Robot El sisteminin endüstriyel alanda kullanılabilmesi için büyük avantajlar ortaya çıkarmaktadır.

Şimdiye kadar ithal yoluyla sağlanan NiTi şekil bellekli alaşımlar tarafımızdan üretimi yapıldığından hem daha kolay ulaşılır hem de daha ekonomik hale geldiğinden üzerinde araştırma ve çalışma yapmak kolaylaşmıştır.

Robot elde, üst parmak içine yerleştirilen balondaki sıvı basıncının sayısal veri olarak alınması, İTÜ Robot Elin bilgisayarla kontrolü sağlayacaktır. Bu konuda çalışmalarımız devam etmektedir.

İTÜ Robot Elin patlayıcı mühimmat taşınması, bulunması, imhası gibi alanlarda ekonomik olarak kullanılabilirliği, denemeleri yapılması gereken bir çalışmadır. Bu amaçla dizayn edilen elde soğutucu sisteme de gerek yoktur.

Robot kolun hareketli hale getirilmesi ile hareket yeteneği geliştirilen İTÜ Robot El mobil bir sisteme monte edildiğinde daha işlevsel bir duruma gelebilir.

NiTi şekil bellekli alaşımın süperelastik özelliği bilindiğine göre, bu özellik kullanılarak da bazı yeni tasarımlar geliştirilebilir.

Ayrıca, şekil bellekli alaşımlarla yapılan sistemlerin çalışma mekanizmasının basitliği, sessiz, etrafa gürültü yaymadan, temiz çalışması, uzaktan komuta edilebilme özelliği, alaşımın hafifliği, korozyona karşı dayanıklılığının yüksek olması gibi özellikleri dolayısıyla, ileriki yıllarda robotikte ve diğer mühendislik çalışmalarında yapılacak tasarımlarda kullanılma oranının daha da artacağı değerlendirilmektedir.

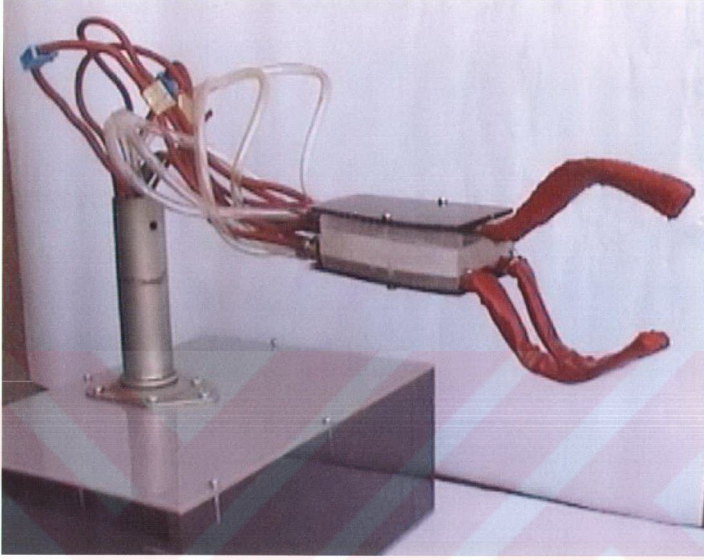
KAYNAKLAR

- [1] **Nalbant, M.**, 1997. Bilgisayarla Bütünleşik Tasarım ve İmalat, Beta Basım, İstanbul.
- [2] **Otsuka, K., Kakeshita, T.**, 2002. Science and technology of shape-memory alloys: New developments, MRS Bulletin, February, pp. 91-100.
- [3] **Selimbeyoğlu E.**, 1992. Design of shape memory alloy actuators, *Ph. D. Thesis*, METU, Ankara.
- [4] **Bhattacharya K.**, 1997. Theory of martensitic microstructure and the shape memory effect, In: (G. Airoldi, I Müller and S. Miyasaki ed.) Shape Memory Alloys: From Microstructure to Macroscopic Properties, Trans Tech Publication.
- [5] **Tabanlı, R.M.**, 2000. Fatigue and fracture of Nickel-Titanium, *PhD Thesis*, University of Miami, Mechanical Engineering, Florida.
- [6] **Selimbeyoğlu, E.**, 1986. Shape Memory Effect in a CuAlNi, *M.Sc.Thesis*, Boğaziçi University, İstanbul.
- [7] **Bor, Ş.**, 1998. Şekil Bellekli CuZnAl Alaşımlarının Üretimi ve Karakterizasyonu, TÜBİTAK Proje Raporu, MİSAG-72, Ankara.
- [8] **Dayı, N., Bilçen B. ve Bor, Ş.**, 2002. Isıl Döngünün CuZnAlMnTi Şekil Bellekli Alaşımların Dönüşüm Sıcaklıklarına Etkileri, *11. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 5-8 Haziran, s.382-387.
- [9] **Tarhan, E., Bor, Ş.**, 2002. CuAlNiMn Alaşımlarında Kritik Dönüşüm Sıcaklıklarının DSC Yöntemiyle Belirlenmesi ve Isıl Döngü Etkileri, *11. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 5-8 Haziran, s.369-375.
- [10] **Esen, Z., Ögel, B. ve Bor, Ş.**, 2002. Bakır Bazlı Şekil Bellekli Alaşımların Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmesi, *11. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 5-8 Haziran, s.1637-1642.

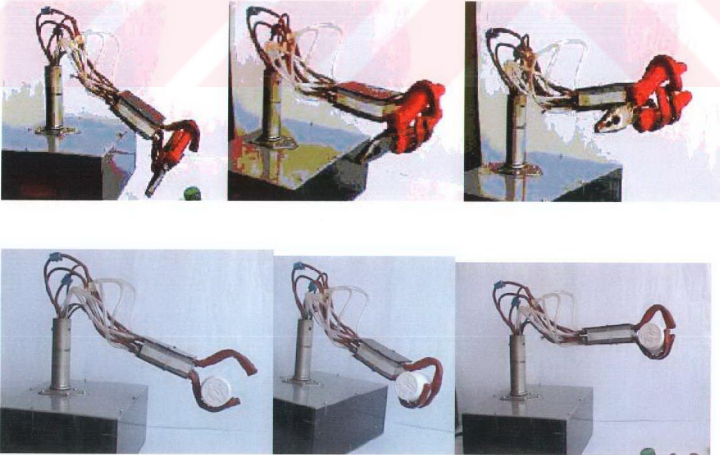
- [11] **Bilçen, B., Bor, Ş.**, 2002. CuZnAlMnTiB Şekil Bellekli Alaşımların Mekanik Karakterizasyonu, *11. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 5-8 Haziran, s.429-435.
- [12] **Janocha, H.**, 1999. *Adaptronics and smart structures*, Springer, Germany.
- [13] **www.sma-inc.com**, Comparison of properties of NiTi and stainless steel, 20-30 Nisan 2003.
- [14] **Mihalcz, I.**, 2001. Fundamental characteristics and design method for Nickel Titanium shape memory alloys”, *Periodica polytechnica Ser. Mech. Eng.*, Vol.45, No:1, pp:75-85.
- [15] **Massalski T.B., Okamoto H., Subramanian P.R. et al.**, 1990. *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd ed., Vol 3, ASM International Materials Park, OH, pp.2874.
- [16] **Duan B.**, 2001. Suppression of composite panel vibration under combined aerodynamic and acoustic excitations at elevated temperatures using shape memory alloy, *Ph. D. Thesis*, Aerospace Engineering, Old Dominion University.
- [17] **Funakubo, H.**, 1987. *Shape Memory Alloys*, Goldon and Breach Science Publishers, New York.
- [18] **Gilbertson R.G.**, 2000. *Muscle Wires Project Book*, Mondo-tronics Inc., USA.
- [19] **Otsuka K., Wayman C.M.**, 1998. *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, UK.
- [20] **Roch, I.**, 2001. Potentialité d'intégration des alliages à mémoire de forme en film mince dans les micro systèmes, *Ph.D. Thesis, University of Lille*.
- [21] **Koren, Y.**, 1985. *Robotics for engineers*, McGraw Hill Book Company, USA.
- [22] **Spiteri, C.**, 1989. *Robotics Technology*, Saunders College Publishing, UK.
- [23] **Festo Ürün Katoloğu**, 2003. Gripper-Handling made easy, Info 152.
- [24] **Pham, D.T., Tacgin E.**, 1992. *Int. J.Mach.Tools Mnifact.*, Vol.32 n.3, pp. 349-360.
- [25] **Chitchlow, A.J.**, 1985. *Introduction to robotics*, Mac Millan, pp.108-112.

- [26] **Leatham-Jones, B.**, 1987. Elements of Industrial Robotics, Pitman Pub., Great Britain.
- [27] **Erkmen, A.**, 1993. Robot elle kavrama planlaması, Elektrik Mühendisliği 393, s.25-30.
- [28] **Pons, J.L., Ceres, R. and Pfeiffer, F.**, 1999. Multifingered dextrous robotics hand design and control, *Robotica*, 17, 661-674.
- [29] **Wolfram, S.**, 1995. Analytical robotics and mechatronics, Mc Graw-Hill, USA.
- [30] **Nof Y.S.**, 1999. Handbook of Industrial Robotics. John Willey & Sons Inc., pp.99-145, New York.
- [31] **Conrad, M.J. and Mills, W.J.**, 1998. Squito advaced experiments with a simple and inexpensive robot, IEEE Computer Society Press, California.
- [32] **Ikuta, K.**, 1990. Micro/Miniature Shape Memory Alloy Actuator, Proc. International Conference on Robotic and Automation , pp2156-2161, 1990.
- [33] **Dilibal S., Güner E. and Akturk N.** 2002. Three-finger SMA Robot Hand and Its Practical Analysis, *Robotica*, 20, 175-180.
- [34] **Dilibal S., Güner E.**, 1999. Üç parmaklı SMA Robot El'in yapımı ve endüstriyel alanda karşılaştırılması, *Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği XX. Ulusal Kongresi*, Kara Harp Okulu, Ankara,. 8-9 Haziran, s.98-99.

**EK A İTÜ ROBOT EL VE ROBOT ELLE ÇEŞİTLİ PARÇALARI
KAVRAMA / KALDIRMA**



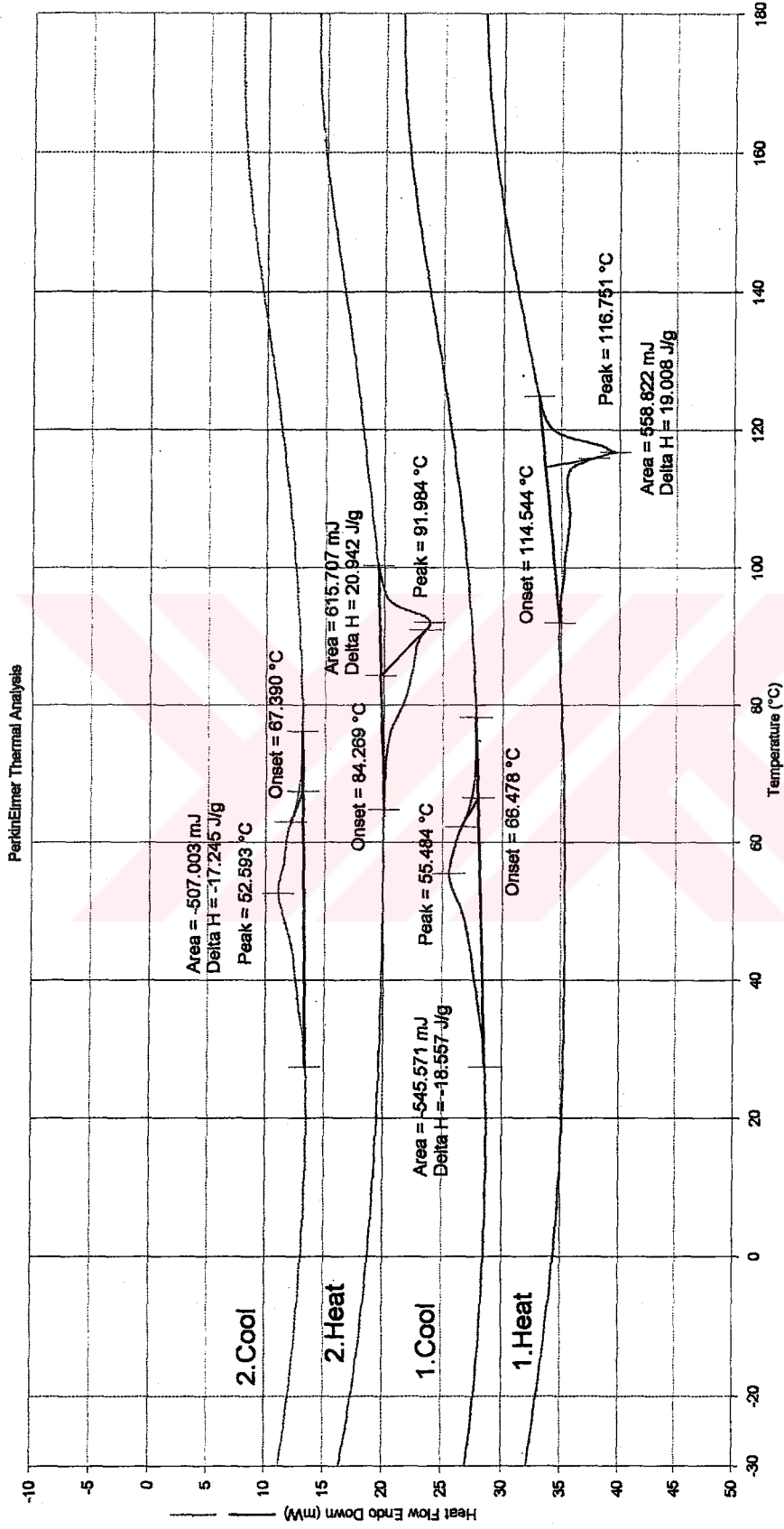
Şekil A.1 İTÜ Robot El



Şekil A.2 İTÜ Robot El ile parça kavrama ve kaldırma

Filename: C:\yedek\END HIZMET-2003\DSC\03_25.dcd
Operator ID: ZK
Sample ID: Nikel-Titanyum
Sample Weight: 29.400 mg
Serial Number: 537N010601
Software Version: 3.81
Initial Purge Gas: Nitrogen
Comment: TYILMAZ\NAN\03

EK B İTHAL EDİLEN NİTİ LEVHALARIN DSC ANALİZİ



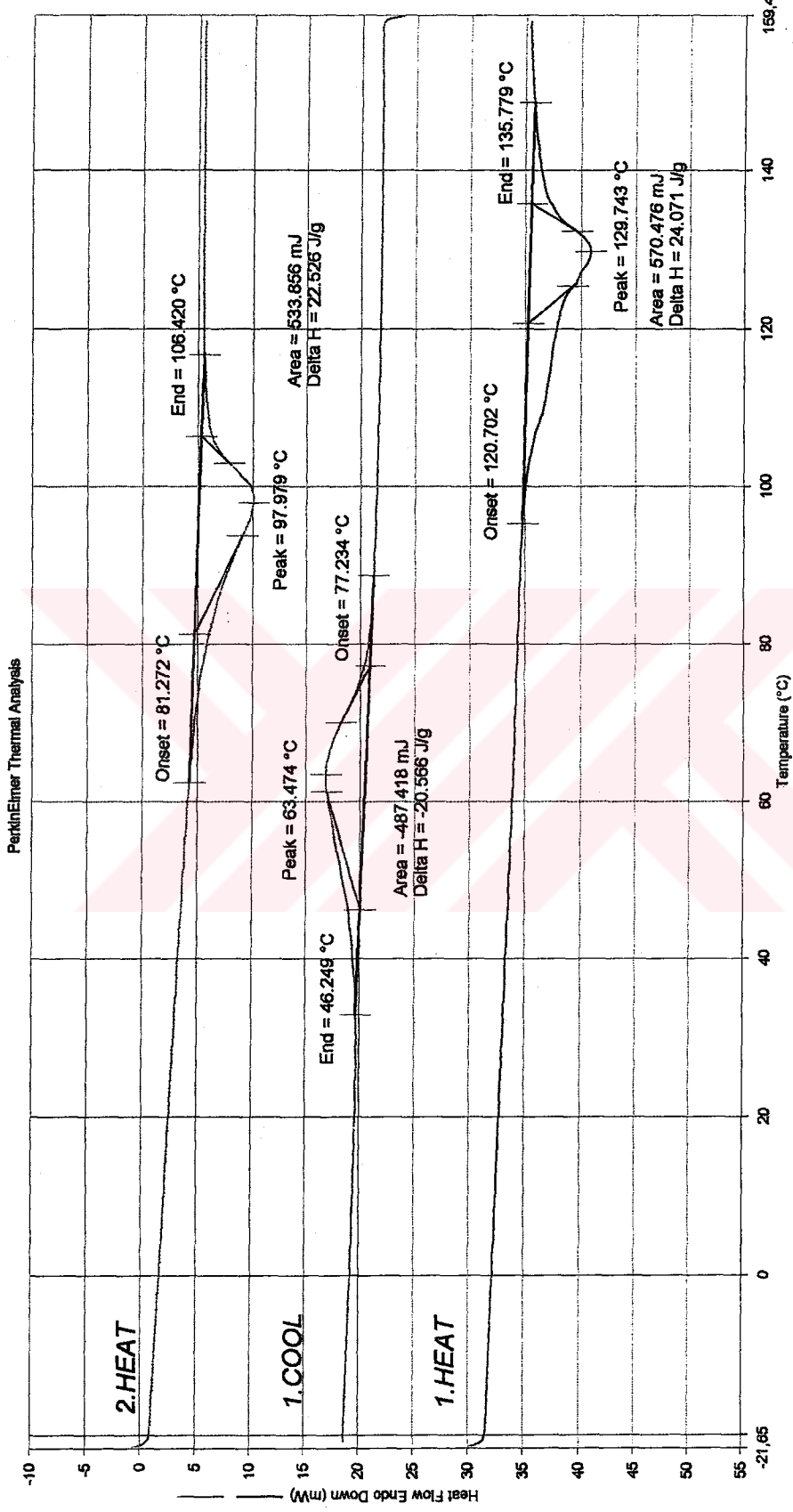
22.04.2003 12:31:21

- 1) Hold for 1.0 min at -40.00°C
- 2) Heat from -40.00°C to 200.00°C at 5.00°C/min
- 3) Hold for 2.0 min at 200.00°C
- 4) Cool from 200.00°C to -40.00°C at 5.00°C/min

- 5) Hold for 4.0 min at -40.00°C
- 6) Heat from -40.00°C to 200.00°C at 5.00°C/min
- 7) Hold for 2.0 min at 200.00°C
- 8) Cool from 200.00°C to -40.00°C at 5.00°C/min

Filename: C:\yedek\END HIZMET-2003\DSC\03_25-2.dcd
Operator ID: ZK
Sample ID: Nikel-Tianyum Numune no:2
Sample Weight: 23.700 mg
Serial Number: 537N0110601
Software Version: 3.81
Initial Purge Gas: Nitrogen
Comment: TYILMAZINAN/03

EK C ÜRETTİĞİMİZ NİTİ LEVHALARIN DSC ANALİZİ



- 1) Hold for 1.0 min at -20.00°C
- 2) Heat from -20.00°C to 160.00°C at 10.00°C/min
- 3) Hold for 2.0 min at 160.00°C

- 4) Cool from 160.00°C to -20.00°C at 10.00°C/min
- 5) Hold for 4.0 min at -20.00°C
- 6) Heat from -20.00°C to 160.00°C at 10.00°C/min

30.04.2003 14:06:28

ÖZGEÇMİŞ

Savaş DİLİBAL, 1973 yılında Reşadiye’de doğmuş, ilk ve orta öğrenimini Tokat/Turhal’da tamamlamıştır. 1991 yılında Işıklar Askeri Lisesi’nde lise öğrenimini tamamladıktan sonra 1995 yılında Kara Harp Okulu’ndan Sistem Mühendisi Topçu Subayı olarak mezun olmuştur. 1999 yılında Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Yüksek Lisans Programını tamamlayan DİLİBAL, 2001 yılında İTÜ Savunma Teknolojileri Programında, Malzeme Tasarım ve İmalat Teknolojileri Yüksek Lisans Programına başlamıştır. Kendisi halen Kıbrıs Türk Barış Kuvvetleri Topçu Alayı’nda (Lefkoşe) Batarya Komutanı olarak görev yapmaktadır.

**I.G. YÜKSEKÖĞRETİM
REKREASYON VE TURİZM**