



T.C.

TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

YÜKSEK SICAKLIK TI TEMELLİ ŞEKİL HAFIZALI

ALAŞIMLARIN ÇEKME TESTİ İLE MEKANİK

KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mukadder KISA

Danışman: Doç. Dr. Semra ERGEN

TOKAT- 2024

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Semra ERGEN danışmanlığında hazırlamış olduğum **“Yüksek Sıcaklık Ti Temelli Şekil Hafızalı Alaşımların Çekme Testi ile Mekanik Karakterizasyonu”** adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, tersinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

.../12/2024

Mukadder KISA

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca sahip olduğu deneyimler ve bilgi birikimleriyle bana her konuda yardımcı olan, destek veren, yol gösteren tez danışman hocam saygıdeğer Doç. Dr. Semra ERGEN’ e öncelikle çok teşekkür ederim.

Her zaman aldığım tüm kararları destekleyen, beni cesaretlendiren sevgili eşime, çalışmamı manevi olarak destekleyen, yanımda olan sevgili çocuklarıma, bu süreçte her konuda dualarını eksik etmeyen canım anneme ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mukadder KISA

ÖZET

YÜKSEK SICAKLIK Tİ TEMELLİ ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN ÇEKME TETSİ İLE MEKANİK KARAKTERİZASYONU

Kısa, Mukadder

Yüksek Lisans, Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Semra ERGEN

Kasım 2024 xiii + 57 sayfa

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte uzay ve havacılık çalışmalarında, biyomedikal, robotik ve medikal alanlarda kullanılacak akıllı malzemelere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Daha konforlu ve pratik yaşam ile birlikte, konforlu otomotiv isteği gibi talepler doğrultusunda yeni malzeme keşfetme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Gelecekte de kullanım alanlarının artacağı tahmin edilmektedir. Elde edilecek malzemelerin işlevselliği, şekil hafıza etkisi, hafıflığı ve dayanıklılığı önemli duruma gelmiştir. Martensitik yapıda iken belli bir dış kuvvet etki etmesi neticesinde değişen orijinal şekillerini, östenit faz sıcaklığına geçtiklerinde büyük oranda geri kazanabilen alaşımlara şekil hafızalı alaşımlar denir. Bunun ana sebebi malzemenin içyapısında gerçekleşen katı faz dönüşümleridir. Şekil hafızalı alaşımların, şekil hafıza etkisi ve süperelastisite özellikleri ilgi çekicidir. Şekil hafızalı alaşımlarda, malzemede geri şekil kazanımı sağlanmaktadır. Bu özellikler sayesinde de geleneksel alaşım sistemlerinden ayrılırlar. Elektronik ve biyomedikal gibi uygulama alanlarında düşük sıcaklıkta gösterilen hafıza özelliği yeterli olmakla birlikte otomobil, havacılık ve petrol uygulamaları için 100 °C den yüksek sıcaklıkta şekil hafıza özelliği gösteren malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda tez çalışmamızda yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere Ti-V-Al alaşımları tercih edilmiştir. Şekil hafızalı Ti-V-Al alaşımlarının tek eksenli çekme testi ile mekanik özellikleri belirlenmiş ve Al içeriğine bağlı değişimleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şekil Hafızalı Alaşımlar, T-V-Al, Martensit Dönüşümler, Mekanik Özellikler, Çekme Testi

ABSTRACT

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF HIGH TEMPERATURE TI BASED SHAPE MEMORY ALLOYS BY TENSILE TEST

Kısa, Mukadder

Master's Thesis, Physics Major

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Semra ERGEN

November 2024 xiii + 57 pages

With today's developing technology, the need for smart materials to be used in space and aviation studies, biomedical, robotic and medical fields is increasing. With more comfortable and practical life, the need to discover new materials in line with demands such as comfortable automotive demand is emerging. It is estimated that their areas of use will increase in the future. The functionality, shape memory effect, lightness and durability of the materials to be obtained have become important. Alloys that can largely regain their original shapes, which change as a result of a certain external force while in martensitic structure, when they pass to the austenite phase temperature are called shape memory alloys. The main reason for this is the solid phase transformations that occur in the internal structure of the material. The shape memory effect and superelasticity properties of shape memory alloys are interesting. In shape memory alloys, shape recovery is provided in the material. Thanks to these features, they are distinguished from traditional alloy systems. Although the memory feature shown at low temperatures is sufficient in application areas such as electronics and biomedical, materials showing shape memory feature at temperatures higher than 100 °C are needed for automobile, aviation and petroleum applications. In this context, Ti-V-Al alloys were preferred in our thesis study to be used in high temperature applications. The mechanical properties of shape memory Ti-V-Al alloys were determined by uniaxial tensile testing and their changes depending on Al content were examined.

Keywords: Shape Memory Alloys, TiVAl, MartensiteTransition, Mechanical Features, Tensile Test

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK SÖZLEŞME SAYFASI.....	iii
JÜRİ KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR	v
ÖZET (TÜRKÇE).....	vi
ABSTRACT (İNGİLİZCE)	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
LİTERATÜR ÖZETLERİ/KURAMSAL TEMELLER/GENEL BİLGİLER....	2
1.1 Martensitik Faz Dönüşümü (Termoelastik, Elastik).....	2
1.2 Şekil Hafıza Etkisi ve Psödoelastisite.....	3
1.3 Şekil Hafızalı Alaşımlar.....	7
1.4 Yüksek Sıcaklıklı Şekil Hafızalı Alaşımlar.....	8
1.5.Ti Esaslı Şekil Hafızalı Alaşımlar ve Uygulama Alanları.....	10
1.6 Şekil Hafızalı Alaşımların Uygulama Alanları.....	12
1.6.1 Otomotiv Uygulamaları	12
1.6.2. Havacılık ve Uzay Uygulamaları.....	15
1.6.3 Robotik Uygulamaları.....	18

1.6.4 Biyomedikal Uygulamaları.....	21
1.6.5 Deniz Uygulamaları.....	27
1.6.6 Yapı Uygulamaları.....	28
1.6.7.Çeşitli Uygulamalar.....	28
1.7. Şekil Hafızalı Alaşım Uygulamalarının Gelecekteki Yönü.....	30
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
2.1. Çekme Testi için Numunelerin Hazırlanması	32
2.2. Çekme Testi.....	32
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
4.SONUÇLAR.....	47
5.KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	57

TABLolar LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 1.4: YSŞHA grupları ve özellikleri.....	9
Tablo .1.6.1: Otomotiv alanındaki mevcut ve potansiyel ŞHA uygulamaları.....	13
Tablo 1.6.2: Havacılık alanındaki mevcut ve potansiyel ŞHA uygulamaları.....	17
Tablo 1.6.4: Biyomedikal alanda mevcut ve potansiyel ŞHA uygulamaları.....	23
Tablo 3.1: Ti-15V-xAl (x: 2,4 ve 6) alaşımlarına ait ters martensit (ostenit) dönüşüm sıcaklıkları	39
Tablo 3.2: Ti-15V-xAl (x: 2,4 ve 6) alaşımlarına ait mekanik özellikler.....	45

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No	Sayfa
Şekil 1.1: DSC grafiğinde Ms, Mf, As ve Af sıcaklık değerlerinin gösterimi.....	3
Şekil 1.2.1: ŞHA faz yapıları ve kristal yapılar	5
Şekil 1.2.2: Flexinol NiTi ŞHA (YS) faz dönüşümü	6
Şekil 1.6.3.1: (a) Yumuşak geçiş yapan el prototipi, (b,c,d,e) çeşitli şeyleri tutan yumuşak robotik el , (f) ŞHA'ların uçan robotları	18
Şekil 1.6.3.2: FestoBionicOpter – yusufçuk uçuşuna ilham kaynağı	20
Şekil.1.6.4.1: (a) Nitinol'den yapılmış Simon vena kava filtresi, (b) kanatlarda kullanılan geçiş tekniği, (c) ŞHA değişken geometrili şerit, (d) 2-Nesil ŞHA aynası.....	22
Şekil.1.6.4.2: Süper elastik nitinol, paslanmaz çelik, kemik ve tendon dokuları için gerilme ve gerinim ilişkisi	25
Şekil 1.6.5: (a) ŞHA'ların kaldırma kuvveti kavramı, (b) ŞHA frekansı. kontrolör, (c) SMA damper	27
Şekil 1.6.7: (a, b) Isıtma öncesi ve ısıtma sonrası 3D baskılı ŞHA2 , (c, d) perdenin orijinal durumu ve geçiş durumu, (e, f) masa lambası bileşeni ve geçiş durumu,(g,h)Perdelerin orijinal ve geçiş durumu	29
Şekil 2.1: Tek eksenli çekme test cihazı.....	33
Şekil 2.2: Çekme testinde numunenin aşamaları	34
Şekil 2.3: Mühendislik eğrisi ve gerçek gerilme eğrisi	35
Şekil 2.4: Çekme testi verileri grafik yorumlama.....	36
Şekil 3.1. XRD grafikleri ve SEM görüntüleri a) Ti-15V-2Al b) Ti-15V-4Al c) Ti-15V-6Al.....	40
Şekil 3.2: Ti-15V-2Al alaşımına ait gerilme / uzama grafiği.....	41
Şekil 3.3: Ti-15V-4Al alaşımına ait gerilme / uzama grafiği	42
Şekil 3.4: Ti-15V-6Al alaşımına ait gerilme / uzama grafiği	43
Şekil 3.5: Ti-15V-xAl (x: 2; 4 ve 6) alaşımlarına ait gerilme / uzama grafiği	44

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simge

Af: Ostenit son sıcaklığı

Amax: Ostenit max sıcaklığı

As: Ostenit başlama sıcaklığı

AuCd: Altın-Cadmiyum

CuAlMn: Bakır-Alüminyum-Mangan

CuAlMnNi: Bakır-Alüminyum-Mangan-Nikel

CuAlNi: Bakır-Alüminyum-Nikel

FeMnSi: Demir-Mangan-Silisyum

Md: Martensit maksimum sıcaklığı

Mf: Martensit son sıcaklığı

Ms: Martenzit başlama sıcaklığı

NiTi: Nitinol

NiTiHf : Nikel-Titanyum-Hafniyum

NiTiZr: Nikel-Titanyum-Zirkonyum

SE: Süperelastisite

TiNiPd: Titanyum-Nikel-Paladyum

TiNiPt : Titanyum-Nikel-Platin

TiVAl: Titanyum-Vanadyum-Alüminyum

To: Martensit ve östenit fazın serbest enerjilerinin eşit olduğu kritik sıcaklık

μm : Mikrometre

Kısaltmalar

DSC: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri

FŞHA: Ferromanyetik Şekil Hafızalı Alaşımlar

İYŞHE: İki Yönlü Şekil Hafıza Etkisi

LC: Rezonans

MEMS: Mikroelektromekanik Sistemler

PE: Psödoelastisite

PWM: Darbe Genişlik Modülasyonu

SE: Süperelastisite

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

SLE: Seçici Lazer Eritme

ŞHA: Şekil Hafızalı Alaşım

ŞHE: Şekil Hafıza Etkisi

ŞHM: Şekil Hafızalı Malzemeler

TVR: Termodeğişken Oranlı

TYŞHA: TekYönlü Şekil Hafızalı Alaşım

TYŞHE: Tek Yönlü Şekil Hafıza Etkisi

XRD: X-Işını Kırınım Cihazı

YSSHA: Yüksek Sıcaklık Şekil Hafızalı Alaşımlar

μm : Mikrometre

GİRİŞ

Asırlardır metaller yapısal malzemeler olarak yaşıntımızda ve endüstriyel alanda önemli bir yer tutmaktadır. Gelişen teknoloji ve konforlu yaşam isteği daha kullanışlı malzemelere olan ihtiyacı artırmıştır. Özellikle uzay ve havacılık araştırmalarında hafif, dayanıklılığı yüksek, yapısal gereklilikleri ve mühendislik işlevselliği sağlayan daha hafif ve daha güçlü malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Son yıllarda araştırmacılar, havacılık endüstrisinde kullanılmak üzere Ti temelli şekil hafızalı alaşımların gelişimi üzerine odaklanmaya başlamışlardır. Ti-V-Al alaşımları %90 üzerinde kalınlığı azaltılabilen harika bir soğuk işlenebilirlik özelliğine sahip metal alaşımlardır. Soğuk işlenebilirlik özelliği çoğu alaşımlarda gözlemlenmediği gibi alaşımların her şekilde her sıcaklıkta kolayca işlenebilmesine ve böylelikle üretim maliyetinin azalmasına neden olur (Yang ve ark., 2015).

Dönüşüm sıcaklığı, yoğunluk ve şekil hafızası etkisinin yanı sıra havacılıkta diğer önemli faktörler, kullanılan malzemenin mekanik özellikleridir. Ti-V-Al yüksek sıcaklık alaşımları özellikle havacılık endüstrisi uygulamaları için iyi bir adaydır. Ti-V-Al alaşımlarının yoğunlukları oldukça düşüktür ve neredeyse saf titanyumun yoğunluğuna ($4,5 \text{ g/cm}^3$) yakındır (Yang ve ark., 2015). Yüksek sıcaklık Ti-V-Al alaşımlarının mekanik özellikleri, ana performans indeksleridir ve bu nedenle, bu alaşımları diğer YSSHA'lara göre daha belirgin hale getirmek için, mekanik özellikleri etkileyen deformasyon davranışlarının ayrıntılı olarak araştırmak gerekir. Söz konusu araştırmalar çoğunlukla tek eksenli deformasyon testi olan çekme testi ile gerçekleştirilir.

Literatürde, Al ilavesinin Ti alaşımlarında dislokasyon hareketlerini sınırlandırdığı ve tane sınırlarını güçlendirdiği bilinmektedir (Zhou ve ark., 2018). Wang ve ark. (2020), düşük Al içeriğine sahip Ti-V alaşımlarında, martensit fazının varlığının mukavemet artırıcı bir faktör olduğunu, ancak tane boyutunun bu aşamada belirleyici rol oynadığını bildirmiştir. Sunulan tez çalışmasında Ti-15V-xAl (x: 2, 4 ve 6) alaşımlarına ait DSC analizleri, SEM (taramalı elektron mikroskobu görüntüleri) ve XRD (x-ışını kırınım grafikleri) birlikte verilmiştir. Malzemelerin mikroyapısı ve faz özellikleri hakkında elde edilen bu bilgiler ışığında yüksek sıcaklık Ti-15V-xAl (x: 2, 4

ve 6) alaşımlarına ait mekanik özellikleri (akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma dayanımı, maksimum uzama ve elastik modülü) çekme testi ile araştırılmıştır.

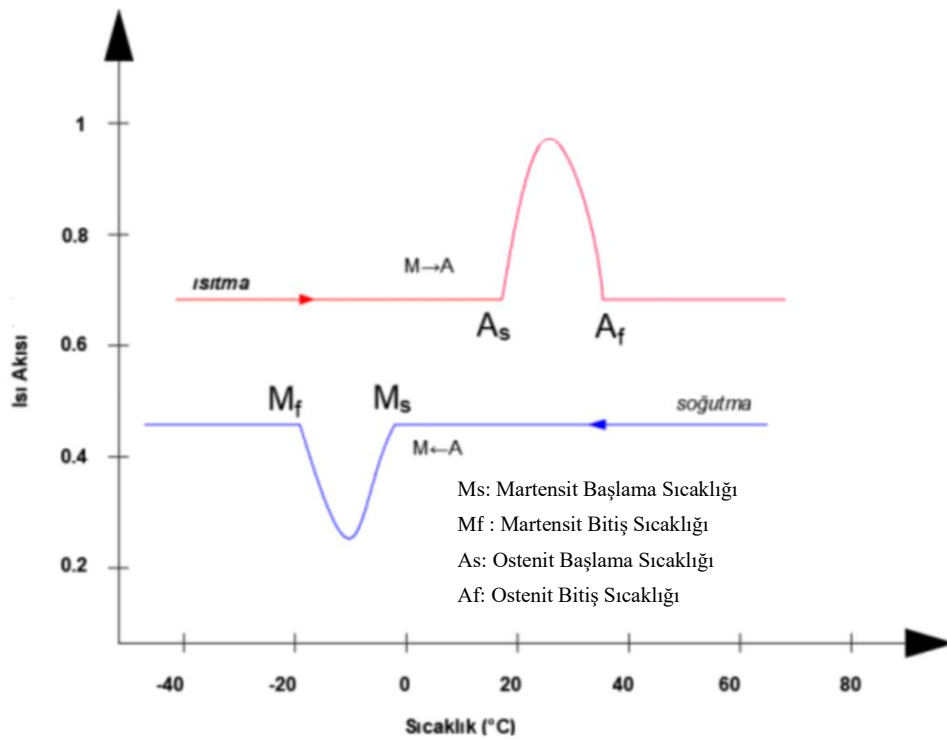
1.1 MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMÜ

Maddenin içyapısının özelliklerine ve maddeyi meydana getiren atomların sıcaklık ve basınç şartlarına bağlı olarak sıralanışına faz denir. Başka bir söyleyişle malzemelerin homojen sınırlarla ayrılmış ve farklı özelliklere sahip bölgelerine faz denir.

Malzemenin bileşim oranında, sıcaklığında veya basıncında meydana gelen herhangi bir değişiklik, faz değişikliğine yol açabilir (Kalay, 2019, Otsuka ve ark., 2002). Termal olarak veya stresle tetiklenebilen martensitik dönüşüm benzersiz özelliklerin çoğunu ortaya çıkarmaktadır (Tong ve ark., 2020).

Şekil hafızalı alaşımlarda dönüşüm sıcaklıkları A_s (ostenit başlama sıcaklığı) ve A_f (ostenit bitiş sıcaklığı) ve M_s (martensit başlangıç sıcaklığı), M_f (martensit bitiş sıcaklığı), olarak adlandırılır. Martensitik faz dönüşümü, şekil hafızalı alaşımlarda iki kararlı faz arasında hızdan bağımsız, tersinir bir kristalografik yeniden yapılanma sürecidir. Martensitik dönüşüm (ostenit-martensit), her iki fazın serbest enerjilerinin eşit olduğu T_0 kritik sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta martensitin serbest enerjisi ostenitin serbest enerjisinden daha düşük olduğunda gerçekleşir. Ancak dönüşüm tam olarak T_0 'da başlamaz. Malzemeye herhangi bir dış etki uygulanmadığı takdirde T_0 'ın (M_s : martensit başlangıç sıcaklığı) altındaki bir sıcaklıkta başlar. M_f (martensit bitiş sıcaklığı) sıcaklığına ulaşıncaya kadar sıcaklık düşürüldükçe dönüşüm daha da iyileşir. ŞHA, martensitik fazdan gerilimsiz olarak ısıtıldığında, martensit fazından ostenit fazına dönüşüm T_0 'dan yüksek bir sıcaklıkta başlar ve malzeme bütünüyle ostenit fazına gelinceye kadar devam eder (Kalay, 2019, Ölander, 1932). Burada A_s - A_f ve M_s - M_f sıcaklıklarındaki farklılıklar, şekil hafıza davranışını nitelendiren önemli etkenlerdir. Dönüşüm sıcaklıkları öncelikle alaşımın bileşimine, üçüncü veya dördüncü bir elementin eklenmesine, alaşımın işlenmesine ve kullanılan ısıl işlemlere bağlıdır. Mikroyapısal yanılıgılar, ana fazın tane boyutu ve ana fazın düzen derecesi de dönüşüm sıcaklıklarını birkaç derece değiştirebilir (Kalay, 2019, Buehler ve ark., 1963). Dönüşüm sırasında, dönüşümün yönüne bağlı olarak gizli ısı emilir veya salınır. Ostenit

fazından martensit fazına ($A \rightarrow M$) entalpi değişimine karşılık gelen ısıнын salınması ısıveren bir faz değişimidir. Martensit fazından ostenit fazına ($M \rightarrow A$) geçiş, ısı enerjisinin emildiği ısı alan bir faz dönüşümüdür. Tanımladığımız maddenin halinin bu sıcaklıkları diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile ölçülür. Bu sıcaklıklar şekil hafızalı alaşımların karakterizasyonunda önemli bir rol oynar (Kalay, 2019, Kaya, 2008). Şekil 1.1 örnek bir DSC diyagramında martensitik faz dönüşüm sıcaklıklarını göstermektedir.



Şekil 1.1 DSC grafiğinde Ms, Mf, As ve Af sıcaklık değerlerinin gösterimi (Jani ve ark., 2014)

1.2-ŞEKİL HAFIZA ETKİSİ VE PSÖDOELASTİSİTE

Pratik olarak, ŞHA'lar üç farklı kristal yapıya (yani ikiz martensit, takviyesiz martensit ve ostenit) ve altı olası dönüşüme sahip iki farklı fazda mevcut olabilir (Sun ve ark., 2009). Ostenit yapısı yüksek sıcaklıklarda, martensit yapısı ise düşük sıcaklıklarda stabildir. Ana faz (ostenit) yapıda yüksek sıcaklıklarda kristal kafes yapısı yüksek simetriye sahip iken (kübik), martensit fazı düşük simetriye sahip tetragonal, monoklinik kristal yapılarına sahiptir (Kalay, 2019). ŞHE; As sıcaklığının altında

deformasyana uğrayan malzeme, Af sıcaklığının üzerine ısıtılırsa meydana gelen tersine dönüşüm sayesinde ilk şekline geri dönmesi olayına denilmektedir (Altuğ, 2017). ŞHE, düşük sıcaklıkta martensitik fazlara sahip alaşımların, dış kuvvetler tarafından deforme edildikten sonra ilk şekillerini geri kazanmak için ısıtılabilceği anlamına gelir. SE, yüksek sıcaklıkta ostenitik fazlara sahip alaşımların, gerilimler ortadan kalkar kalkmaz başlangıç şekillerini geri kazanabilme yeteneğini ifade eder (Dang ve ark., 2023).

ŞHA ısıtıldığında martensit fazından ostenit fazına dönüşmeye başlar. Ostenit başlangıç sıcaklığı (As) bu dönüşümün başladığı sıcaklık, ostenit bitiş sıcaklığı (Af) ise dönüşümün tamamlandığı sıcaklıktır (Jani ve ark., 2014).

Bir ŞHA ısıtıldığında orijinal formuna dönmek için As büzülmeye ve ostenitik bir yapıya dönüşmeye başlar. Bu dönüşüm yüksek yükler altında da mümkündür. Bu nedenle harekete geçirme enerjisinin yükselmesine yol açar (D. C., 2010). Soğutma işlemi sırasında, dönüşüm martensit başlangıç sıcaklığından (M_s) martensit bitiş sıcaklığına (M_f) Martensitin strese neden olamayacağı en yüksek sıcaklığa M_d denir (Duering ve ark. 1994). ŞHE ve süper esneklik olarak bilinen bu şekil değiştirme etkileri, aşağıdaki gibi üç şekil hafıza özelliğine ayrılabilir.

a) Tek Yönlü Şekil Hafıza Etkisi(TYŞHE)

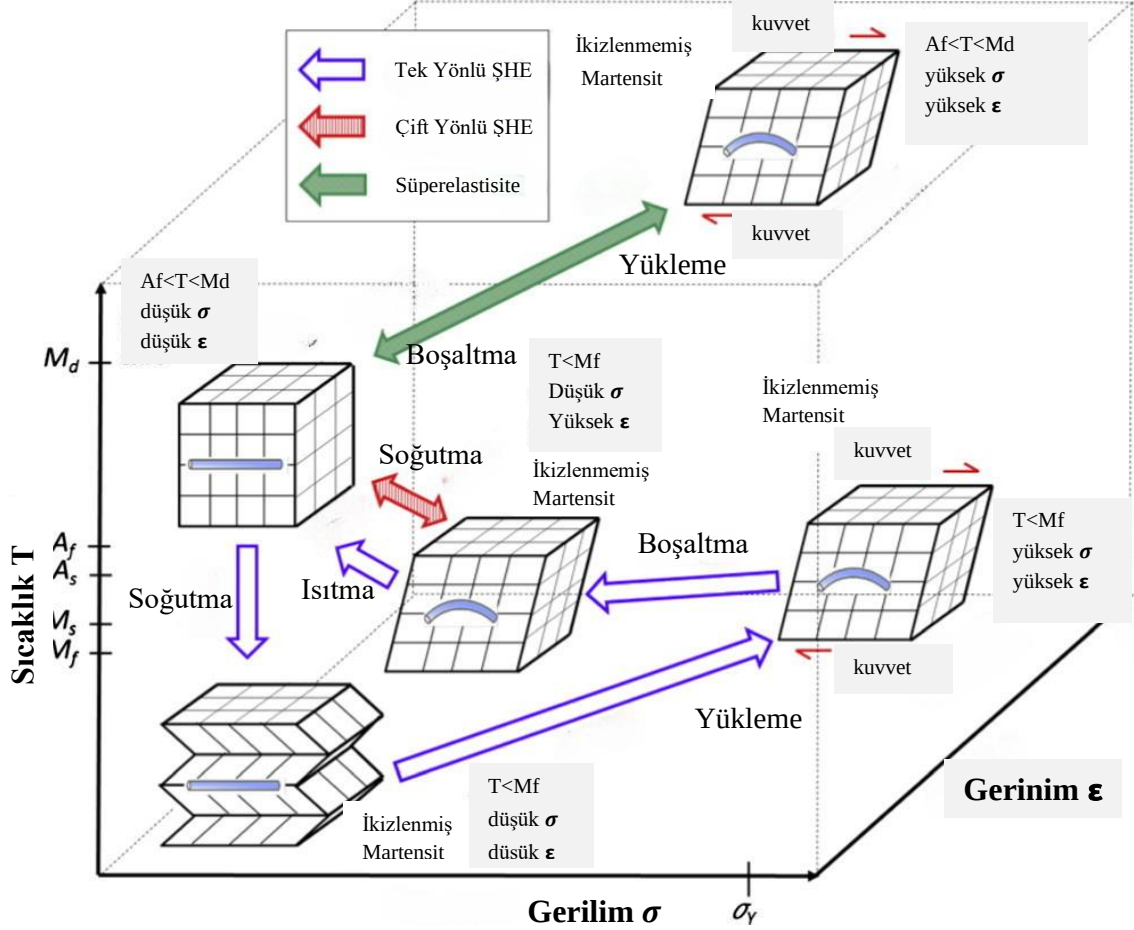
Tek yönlü ŞHA(TYŞHA), bir dış kuvvetin uzaklaştırılmasından sonra deforme olmuş bir durumu korur ve sonrasında ısıtıldığında orijinal şekline geri döner.

b) İki Yönlü Şekil Hafıza Etkisi(İYŞHE)

Tek yönlü etkisinin yanı sıra hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda çift yönlü ŞHA formunu hatırlayabilir. Ancak İYŞHA, eğitim gereksinimleri ve genellikle aynı materyali gerektirir. TYŞHA tarafından sağlanan geri kazanım geriniminin yaklaşık yarısını ürettiğinden ve gerinim özellikle yüksek sıcaklıklarda hızla bozulma eğiliminde olduğundan ticari olarak daha az kullanılır. Bu nedenle TYŞHA daha güvenilir ve ekonomik çözüm sunar (Stöckel ve ark., 1995).

c) Psödoelastisite(PE) veya Süperelastisite(SE):

ŞHA, A_f ile M_d arasındaki sıcaklıklarda termal aktivasyona gerek kalmadan mekanik stres sonrasında orijinal şekline geri döner.

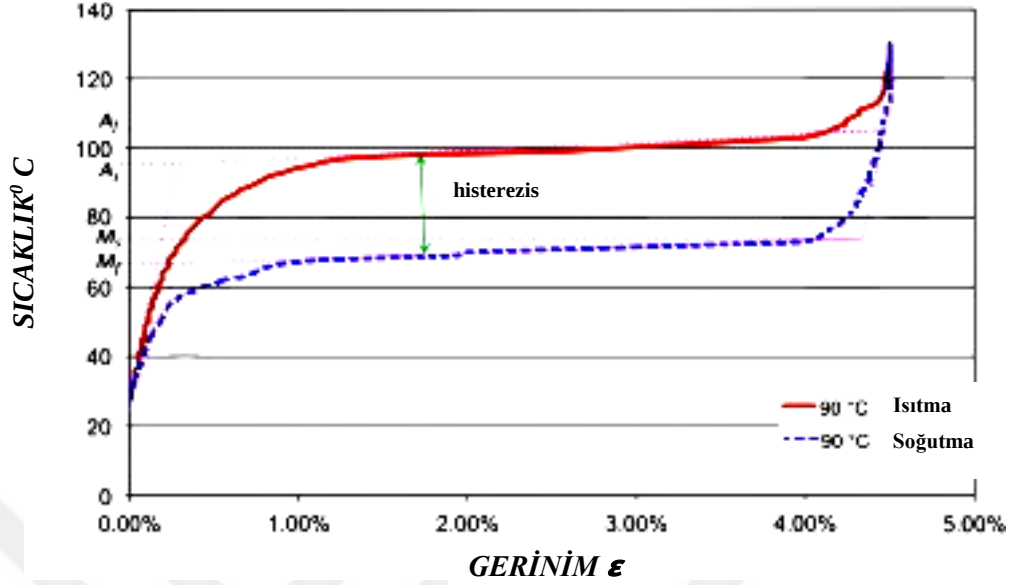


Şekil.1.2.1 ŞHA fazları ve kristal yapıları.(Jani ve ark., 2014.)

Histerezis, ısıtma ve soğutma arasındaki geçiş sıcaklıklarındaki farkın bir ölçüsüdür.

$$\Delta T = A_f - M_s \quad (1.2)$$

Genellikle malzemenin ısıtma sırasında %50 oranında ostenite dönüştüğü ve %50 oranında soğuduktan sonra martensite dönüştüğü sıcaklıklar arasında tanımlanır (Buehler ve ark., 1968).



Şekil .1.2.2 Flexinol NiTi ŞHA (YS) faz dönüşümü (Jani ve ark., 2014)

Bu özellik önemlidir ve hedeflenen mühendislik uygulamaları için ŞHA malzemeleri seçilirken dikkate alınmalıdır. Örneğin hızlı çalışan uygulamalarda (MEMS ve robotik gibi) küçük bir gecikmeye ihtiyaç vardır. Önceden tanımlanmış yayılabilir yapılar ve boru bağlantıları gibi yapıları, geniş bir sıcaklık aralığında muhafaza etmek için daha büyük histerezis gerekir (Liu, 2010). Ayrıca histerezis, uygulamanın çalışma aralığını tanımlamak için kullanılan sıcaklıklardır. Bu geçiş sıcaklıkları ve histerezis döngüsünün davranışı, ŞHA malzemesinin bileşiminden, ŞHA'a uyarlanan termomekanik süreçten ve uygulamanın çalışma ortamından (örneğin uygulanan stres) etkilenir (Stöckel, 1995). Bu geçiş sıcaklıkları, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), dilatometri, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak elektrik direnci gibi çeşitli tekniklerle doğrudan ölçülebilir ve bir dizi sabit voltajlı termal döngü deneylerinden dolayı olarak belirlenebilir (Ma, 2010).

ŞHA'ların fiziksel ve mekanik özelliklerinden bazıları da Young modülü, elektriksel direnç, termal genleşme katsayısı (Sreekumar ve ark. 2007) gibi bu iki faz arasında farklılık gösterir. Ostenit yapısı nispeten serttir ve çok daha yüksek Young modülüne sahiptir; martensit yapı daha yumuşak ve daha dövülebilirdir. Bir dış kuvvet (Mihalcz, 2001) uygulanarak kolayca deforme olabilir.

Martensit akma dayanımının altında bir dış gerilim uygulandığında (NiTi alaşımları için yaklaşık %8,5 gerinim ve bakır bazlı alaşımlar için %4-5), ŞHA geri kazanılabilir gerinim ile elastik olarak deforme olur. Bununla birlikte, elastik olmayan büyük bir deformasyon (kalıcı plastik deformasyon) bu noktanın ötesinde ortaya çıkacaktır. NiTi alaşımları gibi çoğu uygulama gerinim seviyesini % 4 veya daha azına kısıtlar (DynalloyInc, 2007).

1.3. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

Teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesi, günlük yaşamımızda ve endüstride ihtiyaçlarımızın çeşitlenmesine yol açmıştır. Bu çeşitlilik, bilim adamlarını ve mühendisleri mevcut malzemelerin niteliklerini geliştirmeye ve üstün özelliklere sahip yeni ürünler ve yeni malzemeler keşfetmeye yöneltmiştir. Akıllı malzemeler de bu kategoriye girmektedir.

Kendilerinde ve çevrelerindeki değişikliklere tepki vererek belirli işlevleri anında ve sürekli olarak yerine getirebilen malzemelere akıllı malzemeler denir. Akıllı malzemeler kategorisine ait şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA'lar), elverişli ısı ve mekanik işlemlerden sonra önceki şekline veya boyutuna dönebilen metalik malzemeler olarak bilinmektedir.

Gelişiminin Tarihçesi

İlk olarak ŞHA'daki katı faz dönüşümü İsveçli fizikçi Arne Ölander tarafından 1932'de keşfedildi ve altın-kadmiyum (Au-Cd) alaşımlarının soğutulduğunda plastik olarak deforme olabileceğini ve ısıtıldığında orijinal konfigürasyonuna dönebileceğini buldu. Vernon, 1941'de bir polimer dış malzemesi için "şekil hafızası" terimini ilk kez tanımladı. Şekil hafızalı malzemelerin (ŞHM) önemi William Buehler ve Frederick Wang tarafından, 1962'de nikel-titanyum alaşımı Nitinol ile tanımlandı.

Donanma Mühimmat Laboratuvarı'nda üretilen ve Nitinol olarak tanımlanan NiTi'un şekil hafıza etkisini (ŞHE) keşfedene kadar (Kauffman&Mayo, 1997) önemi fark edilmedi. O zamandan bu yana mühendislik ve mühendislik uygulamalarına yönelik ŞHA'lara olan talep ticari olarak arttı. Tüketici mallarında ve endüstriyel uygulamalarda, yapılar ve kompozitler, otomotiv, havacılık, mini tetikleyiciler ve

mikroelektromekanik sistemler (MEMS) (Sun ve ark., 2012), robotik, biyotıp (Sun ve ark.,2012) ve hatta moda alanındaki uygulamalar neticesinde talepte artışlar gözlenmeye başladı. FeMnSi, CuZnAl ve CuAlNi gibi demir ve bakır bazlı ŞHA'ların kararsızlıkları, dayanıksızlıkları ve düşük termomekanik performansları (Huang, 2002) nedeniyle ucuz ve ticari olarak temin edilebilir olmasına rağmen, NiTi bazlı ŞHA'lar bu amaçla kullanılmaktadır. Çoğu uygulamada çok daha fazla tercih edilir. Bütün bunlara rağmen her malzemenin belirli gereksinimler ve uygulamalar için kendine has avantajları vardır.

Uyarlanabilir veya akıllı işlevlere ve özelliklere sahip "akıllı" sistemlere yönelik teknolojik ilerleme, sensörlerin, aktüatörlerin ve mikro denetleyicilerin daha fazla kullanılmasını gerektirir. Bu durum ilgili makine bileşenlerinin ağırlık ve hacminde istenmeyen bir artışa yol açmaktadır. Akıllı, özellik açısından yoğun uygulamalar geliştirmek, kullanılabilir alan, işletim ortamı, yanıt süresi ve izin verilen maliyet gibi teknik ve ticari kısıtlamaların aşılmasını gerektirir (Kurgun, 2019).

1.4-YÜKSEK SICAKLIKLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

Yüksek sıcaklık uygulamalarına olan talebin artması nedeniyle, NiTi-ŞHA'ya üçüncü bir element eklenerek (örneğin Au, Hf, Pd, Pt ve Zr) yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımlar (YSSHA'lar) üzerinde kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Uygulamada YSSHA'lar 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalışan ŞHA'lar olarak tanımlanır ve martensitik dönüşüm bölgelerine göre üç kategoriye ayrılabilir.

Ne yazık ki çoğu YSSHA'nın sınırlı sünekliği veya oda sıcaklığında düşük yorulma direnci nedeniyle işlenmesi ve eğitilmesi çok zordur. Bu da onların üretimini maliyetli hale getirmektedir. Bu nedenle bakır ve kobalt gibi alternatif düşük maliyetli malzemeler veya bileşimler araştırılmıştır. Şu anda yalnızca TiNiPd, TiNiPt, NiTiHf, NiTiZr ve CuAlMnNi alaşımları 100–300 °C'de kullanılabilir; diğerleri ticari uygulamada önemli zorluklarla karşılaşmıştır ve daha fazla araştırma gerektirmektedir (Ma ve ark., 2010).

Tablo 1.4 . YSSHA grupları ve özellikleri (Jani ve ark., 2014.)

Grup	Alaşım bileşimi	Dönüşüm sıcaklık aralığı (°C)	Termal histerezis (°C)	Gerilme k (%)	İyileşme k (%)	Yorumlar
100–400 °C	Ti–Ni–Pd	100–530	20–26	2.6–5.4	90PE - 100	Yüksek iç çıktısı, çoğu ticari hazır ürün ve yüksek malzeme maliyeti
	Ti–Ni–Pt	110–1100	31–55	3–4	100	Makul KOBİ, büyük histerezis ve nispeten düşük malzeme maliyeti
	Ni–Ti–Hf	100–400	60	3	100	
	Ni–Ti–Zr	100–250	54	1.8	100	
	Cu–Al–Ni	100–400	21.5	3–5 ^{PE}	80–90 ^{PE}	Düşük maliyetli, zayıf ila makul KOBİ ve gerilimde kırılğan (Cu–Al–Ni)
	Cu–AlNb		59–170	5.5–7.6	–	
	Kömür	100–400	121	2	90	İyi işlenebilirlik, büyük histerezis ve yüksek sıcaklıktaki PE (Co–Ni–Al)
	Es–Ni–Al		15.5	5 ^{PE}	100 ^{PE}	
	Ni–Al	100–300	-	-	-	Malzeme maliyeti düşük, histerezisi düşük ve çekme sünekliği zayıf
	Ni–Mn	100–670	20	3.9	90	
	Ni–Mn–Ga	100–400	85	10	70	
	Zr–Cu	100–600	70	8	44	Sünekliği ve işlenebilirliği iyi, ancak KOBİ zayıf
	Ti–Nb	100–200	50	2–3	97–100	İyi süneklik ve ŞHE, ancak oksidasyondan şüpheleniliyor ve Uranyum (U–Nb) içeriyor
	U–Nb	100–200	35	7		
400–700 °C	Ti–Pd	100–510	40	10	88	İyi süneklik (Ti–Pd), ancak malzeme maliyeti

Grup	Alaşım bileşimi	Dönüşüm sıcaklık aralığı (°C)	Termal histerezis (°C)	Gerilme k (%)	İyileşme k (%)	Yorumlar
						yüksek(Ti-Pt)
	Ti-Au	100-630	35	3	100	
>700 °C	Ti-Pt-Ir	990-1184	66.5	10 ^{PE}	40 ^{PE}	Yüksek akma dayanımı.
	Ta-Ru	900-1150	20	4	50	Mikroyapısal olarak kararlı, ancak oksidasyon direnci zayıf ve histerezisi küçük
	Nb-Ru	425-900		4.2	88	

Not: PE = Psödoelastik.

1.5.Tİ ESASLI şEKİL HAFIZALI ALAşIMLAR VE UYGULAMA ALANLARI

şimdiye kadar çalışılan yüksek sıcaklıklı şekil hafızalı alaşımlar Ti-Ni-X (X =Au, Zr,Pt, Hf, Pd) alaşımları, Ni- Mn bazlı alaşımlar (Leo ve ark., 1998), Zr-Cu bazlı alaşımlar, Cu bazlı alaşımlar ve β Ti bazlı alaşımlar, Ti-Nb bazlı alaşımlar (Sun ve ark., 2012), Ti-Mo bazlı alaşımlar, Ti-Ta bazlı alaşımlar, Ti-Pd/Pt bazlı alaşımlar ve Ti-V bazlı alaşımlardır (Petrini&Migliavacca, 2011)

Ti esaslı en bilinen şekil hafızalı alaşım NiTi dır. Nitinol, şekil hafıza etkisi ve süper esneklik akıllı davranışıyla bilinen bir şekil hafızalı alaşımdır (Zhang ve ark., 2020). şekil Hafıza Etkisi, farklı sıcaklık aralıklarında yüksek deformasyon uygulamaları için çok önemli bir role sahiptir (Yu ve ark., 2022). Nitinol, kendi orijinal boyutunun %8-15 oranında uzama kapasitesine sahip olan ve deformasyonun giderilmesinden sonra orijinal şeklini geri kazanabilen süper esneklik özelliğine sahiptir (DesRoches ve ark., 2004). Ni açısından zengin nitinol (Ni>%50), ısıtmaya gerek kalmadan orijinal konumunu koruyabilen oldukça süper elastik bir malzemedir. Bununla birlikte Ti açısından zengin nitinol (Ti>%50), Ti'nin reaktif doğasından dolayı ikincil fazların oluşumuna eğilimlidir (Zhan ve ark., 2023). Nitinol şekil hafıza etkisi ve süper esneklik davranışlarına ek olarak biyouyumluluğa (Sevcikova ve ark., 2017) korozyon ve aşınma direncine ve mükemmel mekanik özelliklere sahiptir (Miyazaki ve ark., 1990). Nitinol, döngüsel yüklemelere maruz kalan yüksek yorulma yükü uygulama alanlarında kullanılabilir. Yüksek yorulma yükü hizmetleri sırasında,

yüksek gerinim genliğine sahip yüksek basınç gerinim artıkları, yorulma ömrünü kısaltabilir (Gupta ve ark., 2015). Çekme-gerilme yüklemesi altında nitinolün döngüsel tepkisi ve yorulma başarısızlığı üzerine yapılan çalışma, çatlak ilerlemesinin yorulma ömrünün %5'inde meydana geldiğini gösterdi (Catoor ve ark., 2019). Döngüsel yükleme uygulamaları sırasında nitinol, mikroyapısal özelliklerine bağlı olarak ostenit ve martensit arasında tersinir katı hal faz geçişlerine maruz kalacaktır. Bu nedenle, mukavemetini ve sünekliğini arttırmak için tane boyutunun kontrol edilmesi çok önemlidir (Favre, 2012).

TiNi alaşımlarının süper elastiklikleri, şekil hafızalı etkileri ve düşük elastik modülleri nedeniyle birçok implant tipine uygulandığı iyi bilinmektedir. (Mosca ve ark., 2012, Yi ve ark., 2019). Ancak TiNi şekil hafızalı alaşımlarda nikelden toksik iyonların salınması mümkün olabilir. Bu toksik iyonlar Ni alerjisi ve aşırı duyarlılık geliştirme riskini beraberinde getirebilir. Geçtiğimiz on yılda, toksik olmayan β -tipi Ti-Zr alaşımları, tamamen biyouyumlu şekil hafızalı alaşımların üretimi için aday olarak tanımlandı. Ayrıca mekanik özellikleri ve martensitik dönüşüm davranışları, Nb, Mo ve Sn gibi yüksek biyouyumlu alaşım elementlerinin eklenmesiyle kontrol edilebilir (Yi ve ark., 2018). Son zamanlarda K. Endoh ve ark. alaşım elementlerinin bu β -tipi Ti alaşımlarının martensitik dönüşüm davranışları ve süper elastikliği üzerindeki etkilerini araştırmıştır (Yi ve ark., 2018). Daha sonra, Ti-Zr-Mo-Sn alaşımlarının, kemik dokusu ikamelerinin uygulamaları için vücut sıcaklığında iyi bir süper elastikiyet sergilediği bulunmuştur (Yi ve ark., 2019). Ek olarak, β -Ti alaşımları Ni içermeyen şekil hafızalı alaşımlar ve mükemmel biyouyumlulukları nedeniyle oldukça ilgi çeken biyomateriyallerdir (Yeon-wook Kim, 2023).

Karşılaştırıldığında, β Ti bazlı alaşımlardaki Ti-V-Al alaşımları, daha yüksek dönüşüm sıcaklığı, daha düşük yoğunluk ve düşük maliyet, üstün işlenebilirlik ve ayrıca nispeten iyi mekanik ve fonksiyonel özellikler dahil olmak üzere çeşitli avantajlara sahiptir (Yang ve ark., 2016). Bunlar, Ti-V-Al alaşımlarının havacılık alanlarındaki sıcaklık potansiyeli en yüksek şekil hafızalı alaşımlar olmasını teşvik etmektedir. Ayrıca, Ti-V-Al alaşımının termo-mekanik işlemten sonra olağanüstü gerinim geri kazanım özellikleri sergilediği bulunmuştur (Jani ve ark., 2014).

1.6. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN UYGULAMA ALANLARI

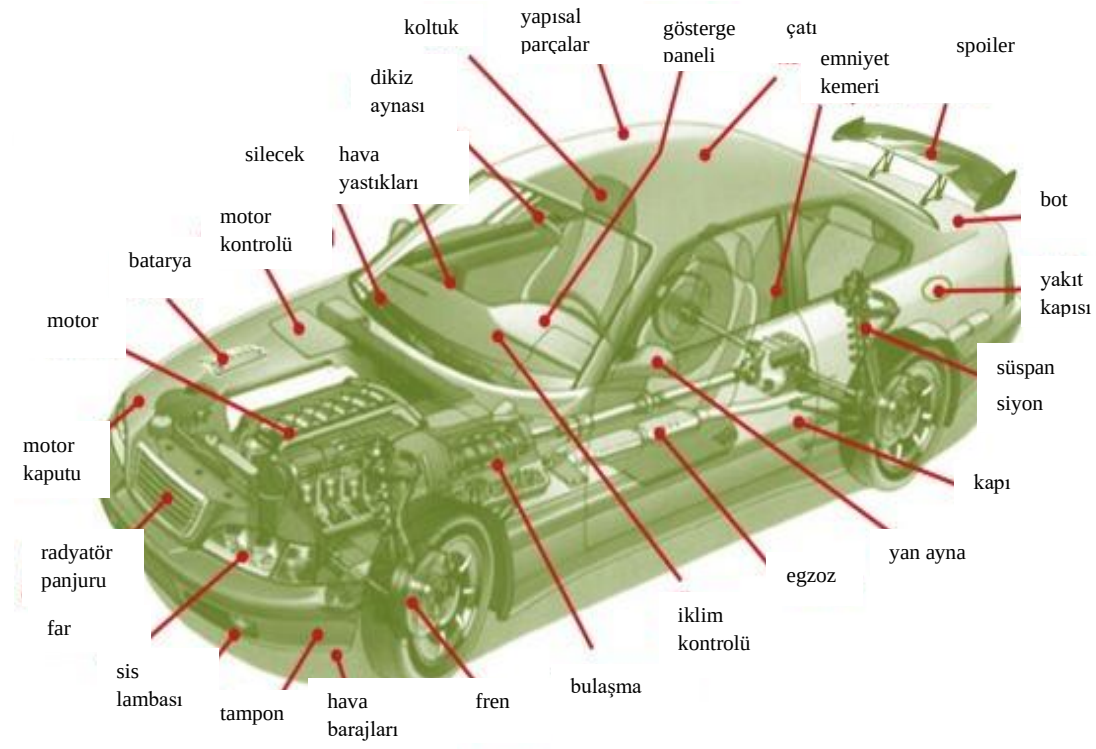
1.6.1.Otomotiv Uygulamaları

General Motors (GM), mühendislerinin 1990'ların ortalarından beri ŞHA uygulamalarıyla çalıştığını ve muhtemelen ilk olarak 2013 model yılı otomobillerinde uygulanacağını iddia ediyor (Song ve ark., 2006). GM şimdiye kadar 247 patent aldı ve yakın zamanda Chevrolet Corvette'in yedinci nesli, bagaj kapağının daha kolay kapanması için bagajdan havayı serbest bırakan kapak havalandırmasını harekete geçiren bir ŞHA aktüatörüne sahip ilk araç olacaktı (GM, 2013). ŞHA'larla gelecekteki teknolojilerinden bazıları, egzoz ısısından elektrik üretmek için bir elektrik jeneratörü, motor bölmesine hava akışını kontrol etmek için duruma bağlı bir aktif panjur, otoyol hızlarında aerodinamik sürtünmeyi azaltmak için isteğe bağlı hava barajı ve açılan araç kapılarını kolaylaştırmak için uyarlanabilir bir 'tutma kolu'dur (Mirzaeifar ve ark. 2012) (bkz.Tablo 1.6.1).

Modern araçlarda, mükemmel bir performansa sahip, güvenilirliği yüksek, daha konforlu araçlara olan istek sebebiyle sensörlerin ve aktüatörlerin sayısı çok hızlı artmaktadır. Ortaya çıkan drive-by-wire teknolojisi, otomotiv uygulamalarında elektromanyetik aktüatörlere seçenек olarak ŞHA aktüatörleri için çok çeşitli olanaklar sunmaktadır (Bellin ve ark., 2006). ŞHA'ların otomotiv endüstrisinde geniş uygulamaları vardır; Yolcu konforunu ve güvenliğini artırmak için motor parçalarını, alan gereksinimlerini, şanzımanı ve yaylı süspansiyonu kontrol etmek için kullanılırlar. ŞHA'lar otomotiv endüstrisinde ayna konumunu ayarlamak için kullanılır. Dönüşüm, Şekil 1.6.1'de gösterildiği gibi iki eksenle gerçekleşir. Kullanılan aktüatörler aynı zamanda ikinci nesil aktüatörler olarak da bilinmektedir (Williams ve ark., 2010). Otomotiv endüstrisinde, ŞHA'lardan oluşan devrilme korumaları motor emme manifoldunu kontrol etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Riccio ve ark., 2021). Bataryadan elde edilen güç, aracın ŞHA cihazlarına güç sağlamak için kullanılabilir (Jani ve ark., 2014). Debriyaj sistemlerinde kullanılan aktüatörler yüksek tork gerektiren ŞHA'lardan oluşabilmektedir. Arabalar, motoru soğutmak için farklı sensörler ve soğutma sistemleri kullanır, bu da araçlara ağırlık katar. Dolayısıyla böyle bir lokasyonda ŞHA'lardan veya deformasyon kanatçılarından oluşan eksenel bir fan kullanılarak bu tür sensörlere ve soğutma sistemlerine olan ihtiyaç ortadan kaldırılabilir

ve maliyetten tasarruf edilebilir. ŞHA, bir çarpışma sırasında yaralanmaları azaltmak için takviyeleri otonom bir yaya koruma sistemiyle değiştiriyor. Binek araçlar için mevcut ve potansiyel ŞHA uygulamaları, araç fonksiyonel alanlarına göre kategorize edilen Tablo 1.6.1 de sunulmuştur.

Tablo 1.6.1: Otomotiv alanındaki mevcut ve potansiyel ŞHA uygulamaları (Jani ve ark., 2014.)



MOTOR DAİRESİ / KAPUT ALTI	GÖVDE VE DIŞ GÖRÜNÜM
Radyatör	Farlar/lambalar
Fan kavraması	Silecek
Motor kontrolü (sensörler ve aktüatörler)	Tavan penceresi/güneşlik
Başlatma kavraması	Kapı ve kilitleme mekanizması
Düşme kapakları	Yan ayna
Yakıt enjektörü/yakıt sistemi	Bot

MOTOR DAİRESİ / KAPUT ALTI	GÖVDE VE DIŞ GÖRÜNÜM
Segmanlar	Motor kaputu
Güçlendirici/şarj cihazı	Benzin kapağı
Vanalar	Tamponlar ve çarpışma yapıları
Pil	Hava barajları
AKTARMA ORGANLARI	Izgara/panjur
Şanzıman kontrolü	Yapısal parçalar/paneller
SÜSPANSİYON/DİREKSİYON/JANT VE LASTİK	İÇ MEKAN/YOLCU ODASI
Fren	Gösterge Paneli
Emici	Dikiz aynası
Yorulmak	Koltuklar
	Hava yastıkları
	Yapısal parçalar/darbeli yapılar

ŞHA aktüatörlerinin mekanik basitliği ve kompaktlığı (minyatürleştirme olanakları), otomotiv bileşenlerinin ölçeğini, ağırlığını ve maliyetini önemli ölçüde azaltır ve tarafından sağlanan örnekte gösterildiği gibi geleneksel aktüatörlere kıyasla önemli performans avantajları sağlar (bkz. Tablo 1.6.1). ŞHA aktüatörlerinin tarafından elektrikle çalıştırılan parlama önleyici dikiz (EAGLE) aynası için 'pantograf' gibi diğer tasarım mekanizmalarına ve tekniklerine uyum sağlama konusundaki çok yönlülüğü; otomotiv uygulamaları için mükemmel bir aktüatör haline getirir.

Otomotiv endüstrisi için geliştirilen diğer bazı ŞHA uygulamaları, geleneksel elektromanyetik ve pnömatik efektörlerin yerini almak için ŞHA aktif otomotiv takla kapakları (Song ve ark., 2010), darbe çarpışmaları anında yaya yaralanmalarını asgari düzeye indirmek için kendiliğinden açılır kaput ile bir yaya koruma sistemi (Maehara&Chikaraishi, 1999), maliyeti düşük bir yan ayna aktüatörü (Krumme&Dickinson, 2001) ve bir FŞHA aktüatörü (D. Brugger ve ark., 2006) ile bir

nesnenin uzaklığının ve açısının görülebilir olarak algılanması için bir mikro-tarayıcı sistemidir (bkz. Tablo 1.6.1).

1.6.2. Havacılık ve Uzay Uygulamaları

Havacılık endüstrisinde ŞHA'ların kullanılmasıyla uçakların ağırlığı azaltılabilir. Bu sayede uçağın yakıt tüketimi azaltılır ve uçağın işletme maliyetlerinden tasarruf edilir. Uçağın dönüşümü aynı zamanda malzemenin özelliklerine ve yapının yüksek hızlardaki sertliğine de bağlıdır. Böyle bir konumda titreşimi azaltmak ve yapısal sağlamlığı korumak için ŞHA'lar kullanılabilir. Kullanım durumuna bağlı olarak aerodinamik yükü azaltır. Şekil 1.6.2'de gösterildiği gibi aerodinamik profili değiştirmeye yardımcı olmak için uçak kanatlarında çeşitli yer değiştirme teknikleri kullanılmaktadır (Chen ve ark., 2019). Helikopter rotorlarında, rotorlar arasındaki farklılıklardan kaynaklanan titreşimi azaltmak için çeşitli aktüatörler kullanılmaktadır. ŞHA, rotorların titreşimini azaltmak ve güvenli çalışmasını sağlamak için böyle bir yerde kullanılabilir. Havacılık uygulamalarında titreşim sönümleyiciler, şoksuz serbest bırakma mekanizmaları, yapısal konektörler, manipülatörler, izolatörler ve yol bulma uygulamaları gibi çeşitli aktüatörler kullanılmaktadır (Jani ve ark., 2014). Boeing, ŞHA'ları kullandı ve Şekil 1.6.2'de gösterildiği gibi değişken geometrili bir Chevron (VGC) geliştirdi. GE 90-115B jet motorunda kullanılır. Bu cihaz uçuş sırasında ok ucunun sapmasını artırarak motor gürültüsünü azaltır (Jani ve ark., 2014).

1970'lerde F-14 savaş uçaklarındaki hidrolik hatlar için ŞHA bağlantısının başarısından bu yana (Melton, 1999), ŞHA'ların eşsiz nitelikleri, yüksek etkin engellere ve geometrik saha kısıtlamalarına rağmen havacılık uygulamalarında kullanılması çok alaka görmüştür. Bu uygulamalara örnek olarak aktüatörler, yapısal konektörler, titreşim sönümleyiciler, contalar, serbest bırakma veya dağıtma düzenekleri (Cleveland, 2008) şişirilebilir yapılar (Fujun ve ark., 2005), manipülatörler ve yol bulucu uygulaması.

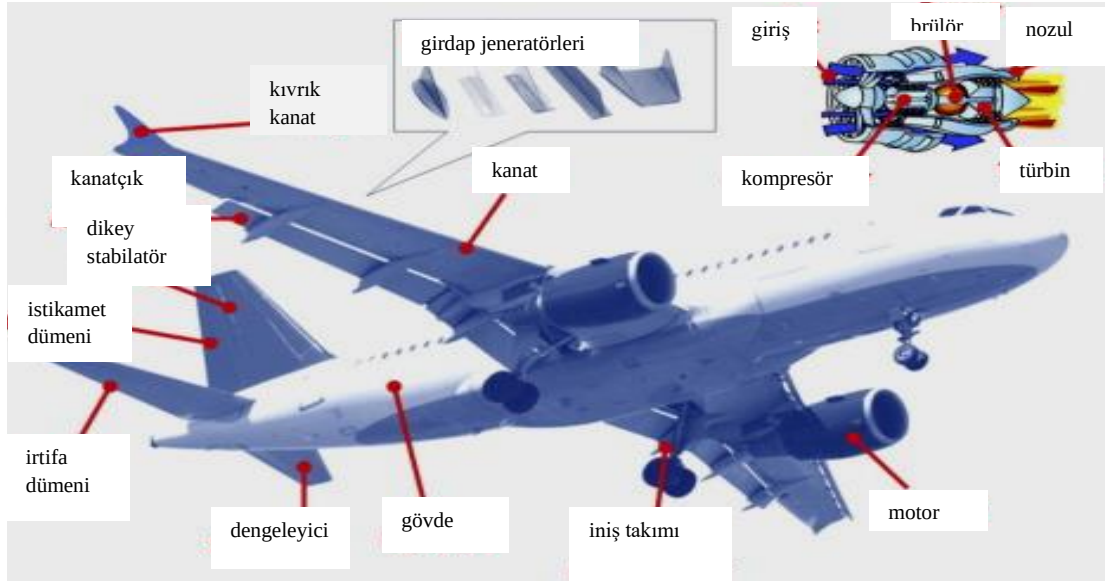
1990'larda, havacılık araştırmacıları, akıllı uçak kanatları için İleri Savunma Projeleri Araştırma Ajansı (DARPA) programında (Kudva, 2004), jet motorları için Akıllı Uçak ve Elektrikle Çalışan Uzay Aracı İtke Sistemi Gösterimi (SAMPSON) programında (Pitt ve ark., 2001) ve bir dizi başka programda (Mieloszyk ve ark.,

2010) olduğu gibi, çeşitli uçuş koşulları altında kapasiteyi ve sistem düzeyinde optimizasyonu dönüştürmeye yönelik aktif ve uyarlanabilir yapılara odaklandılar (Sofla ve ark., 2010). Boeing, değişken geometrilili chevron (VGC) olarak da tanınan ve GE90-115B jet motoruna (Boeing 777-300 ER ticari uçakları için) monte edilen ŞHA aktüatörlerine sahip aktif tırtıklı bir aerodinamik cihaz geliştirdi. Bu cihazın, chevron sapmasını en üst düzeye çıkararak kalkış sırasında gürültüyü azaltmada ve ayrıca uçuşun devamında chevron sapmasını en aza indirerek ilerleyiş randımanını artırmada çok etkili olduğu ispatlanmıştır (Oehler ve ark., 2012) (bkz. Şekil 1.6.2). Bir çekirdek egzoz chevron tasarımı için yüksek sıcaklık gereksinimi, NASA Glenn Araştırma Merkezi'nde (Noebe ve ark., 2009) yeni TiNiPt YSSHA'nın tanımlanması, test edilmesi ve doğrulanması ile çözüldü.

VGC'nin başarısını takiben, Boeing, DARPA, NASA ve diğer ilgili araştırma ajanslarınca Calkins ve Mabe (2010), tarafından gözden geçirilen, savaş uçaklarına değişken motor giriş kabiliyeti sağlayabilecek akıllı giriş, oldukça dayanıklı olan yeniden yapılandırılabilir rotor kanadı ve rotor aerodinamik niteliklerini en iyi duruma getirmek için bükülebilir döneç kanadı gibi daha fazla ŞHA tabanlı teknoloji programı başlatılmıştır. Son zamanlarda, VGC teknolojisine dayanan değişken geometrilili pervane nozulunun jet motoru performansını artırdığı gösterilmiştir.

Sofla ve ark. (2010), uçak kanat değiştirme teknolojilerinin kapsamlı bir incelemesini sunmuşlar ve ayrıca aerodinamik performansı artırmak için kanat profiline bükülme ve bükülme yoluyla değiştirilmesini sağlayan antagonistik ŞHA ile harekete geçirilmiş eğilme yapısal formları uygulayarak küçük uçaklar için bir şekil değiştirme kanat tasarımı geliştirmişlerdir (bkz. Şekil 1.6.2). Icardi ve Ferrero (2009), tarafından sunulan sonlu elemanlar simülasyonları ile yapılan bir ön tasarım çalışması, tamamen ŞHA cihazları tarafından tahrik edilen küçük bir insansız hava aracı (İHA) için uyarlanabilir bir kanadın, diğer geleneksel aktüatörlere kıyasla ağırlık artışı veya sertlik kaybı olmadan, herhangi bir uçuş koşulunda aerodinamik basıncı taşıyabileceğini doğrulamıştır. Ayrıca, rotor kanadı bükümü (Caldwell ve ark., 2007), rotor kanadı izleme sekmesi, rotor kontrolü ve rotor kanadı ucu morfasyonu (Testa ve ark., 2005) dahil olmak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından yürütülen ŞHA'larla rotor teknolojisinde (rotorcraft) önemli araştırmalar yapılmıştır.

ŞHA'lar uzay araçlarında uzun yıllardır düşük şoklu salınım mekanizmaları olarak kullanılmaktadır, çünkü kademeli ısıtma ile yavaşça harekete geçirilebilirler, titreşimi çok iyi emebilirler ve ortalama ve daha küçük boyutlu uzay araçları (örneğin mikrosatellit) (Johnson, 1992) için en uygun olan basit ve kompakt tasarımlarda üretilebilirler.

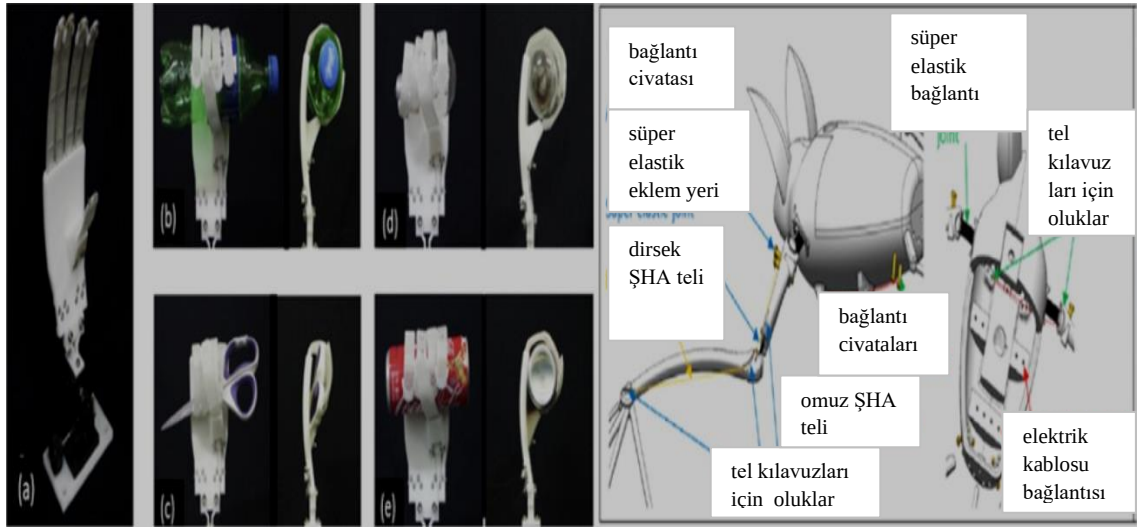


Tablo 1.6.2: Havacılık alanında mevcut ve potansiyel ŞHA uygulamaları(Jani ve ark., 2014.)

Parçalar	Parçalar
GÖVDE	MOTOR
Aeroyapı/kompozit gövde	Giriş
Cilt/panel	Nozul
Kanat/yüzgeç/stabilizatör	Rotor
Kanat	İNİŞ TAKIMI
Kanatçık	ELEKTRO-MEKANİK KONTROL
Girdap üretici	Hidrolik hatlar
Kanat kenarı	
Yapı/direkler	

1.6.3 Robotik Uygulamalar

ŞHA, bir robot manipulatörünün ellerinin yerine kullanılabilir. Bu tür yapay eller farklı eklemler gerektirir, bu da onları hantal ve maliyetli hale getirir. ŞHA teli, Şekil 1.6.3.1(ae)'de gösterildiği gibi esnekliği ve telin geniş bükülme ve büzülme özellikleri nedeniyle (Kim ve ark., 2016) bu tür yerlerde kullanılabilir. Mikro robotların direnç geri besleme kontrolü kullanılarak ek sensör ihtiyacı ortadan kaldırılabilir. ŞHA'lar kullanarak çeşitli uçan robotlar geliştirilmiştir (Furst ve ark., 2013). ŞHA'lar, Şekil 1.6.3.1(f)'de gösterildiği gibi robotların hareketlerini kontrol etmeye yardımcı olur.



Şekil 1.6.3.1. (a) Yumuşak geçiş yapan el prototipi , (b,c,d,e) çeşitli şeyleri tutan yumuşak robotik el , (f) ŞHA'ların uçan robotları (Rajput ve ark., 2022)

1980'lerden bu yana ŞHA robotik uygulamalarının çoğu canlıların biyolojik özelliklerinden esinlenilmiştir. Yani biyomekanik ve biyomedikal alanlarda yaygın olarak kullanılmakla beraber diğer alanlarda da çokça kullanılmaktadır. Robotik alanıyla ilgili başlıca zorluklar; donanım standının başarımını ve minyatürleşmesini artırmak ve tümleşik sistemin (yani küçük, daha hızlı, güvenilir ve özerk) zekasını artırmak. Sıkıştırma zorlukları, düşük elektrik direnci, minyatür elektrik bağlantısı (mikro robotlar için), küçük gerinim çıkışı, kontrol sorunları ve çok düşük verim gibi çeşitli teknik sorunlar söz konusudur ve çözüm üretilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, bu sorunların bazıları, uygun modelleme teknikleri, kontrol teknikleri ve geri bildirim duyargaları seçilerek ele alınmıştır. Örnek olarak, direnç geri besleme kontrolü,

sınırlı doğrulukla da olsa ek duyargaların gerekliliğini ortadan kaldırdığı için mikro robotlar için idealdir (Sreekumar ve ark., 2007).

Daha önce de belirtildiği gibi, ŞHA aktüatörlerinin tepki oranı, şekline ve boyutuna önemli ölçüde bağlıdır ve bunlar, robotik cihazın genel boyutu ve serbestlik dereceleri üzerinde yüksek bir etkiye sahiptir. Rezistif ısıtma genellikle küçük ŞHA aktüatörleri (400 µm çapa kadar) için kullanılır ve daha kalın aktüatörler için dolaylı ısıtma teknikleri uygulanır (Sreekumar ve ark.,2007). Çalıştırma frekansını artırmak için, hızlı bir ısıtma tepkisi elde etmek için kapasitörler daha kalın aktüatörlerle birleştirilir ve soğutma işlemini geliştirmek için daha önce de belirtildiği gibi çeşitli soğutma stratejileri benimsenebilir, ancak bunlar cihazı daha hantal hale getirir (Sreekumar ve ark., 2007). Ayrıca, robotların serbestlik derecelerini artırmak için, aktüatör sayısının artırılması gerekir, bu da karmaşık kontrol sorunlarına yol açar.

Siong ve ark. (2005), tarafından protez el için yeni bir ŞHA aktüatör tasarımı tanıtılmıştır; burada geleneksel itme-çekme tipi ve ön koşullu yay tipi kullanmak yerine robotik parmağı harekete geçirmek için iki ŞHA aktüatörü kullanılmıştır (bkz. Şekil 1.6.3.1). İki aktüatör, aynı anda bir ısı emici ve kılavuz olarak işlev gören dış paslanmaz borunun her iki ucundan yerleştirilir. Akım, tüpün merkezinde (tellerin birleştiği yerde) ve tüpün her bir ucunda bulunan elektrot noktaları aracılığıyla tellerden asenkron olarak geçti. İki aktüatör, insan parmağı hareketlerinin (fleksiyon ve ekstansiyon) hareketlerini neredeyse kopyalayabilen robotik parmağı harekete geçirmek için kullanılır. Aşırı ısınmayı ve aşırı güç kullanımını önlemek için aktüatörlere milisaniyeler içinde periyodik olarak yüksek voltaj atmak için bir PWM kontrolörü kullanılır.

Kheirikhah ve ark. (2011), tarafından yapılan yakın tarihli bir derlemede, robotları hareket stillerine ve tarayıcı, jumper, çiçek, balık, yürüteç, tıbbi ve biyomimetik robotik el gibi uygulamalarına göre çeşitli kategorilere ayırdılar. Birçok robotik araştırmacısı, biyomemitik ve insansı robotlar geliştirmekle daha fazla ilgileniyor. Bu robotlar, su altı, uzay, hava ve karadan ilgili bilgileri sağlayarak insanlar için zorlayıcı olan problemleri çözmede yararlıdır. Bu robotların geliştirilmesindeki kapsamlı detaylar ve zorluklar, özellikle ŞHA aktüatörleri olmak üzere çalışma

teknolojilerine odaklanan birkaç araştırmacı tarafından özetlenmiştir. Tao ve ark. (Tao ve ark., 2006), hızlı tepki ve güçlü bir itme gücü sağlayabilen bir FSHA hibrit mekanizması kavramına dayanan kaudalpedinkül aktüatörlü robotik bir balık tasarladı.

Mohamed Ali ve Takahata (2010), RF manyetik alanıyla kablosuz olarak çalıştırılabilen pasif (yani dahili güç kaynağı olmadan) mikro tutucular (yani yaklaşık 600 μ mdeplasman) geliştirdiler. Mikro tutucunun imalatı, SHA aktüatörünün foto-tanımlı elektrokaplama teknolojisine sahip bir indüktör-kapasitör (LC) rezonans devresine veya yakınına bağlandığı ve daha sonra bir μ EDM işlemi ile mikro işlendiği yarı iletken endüstrisindeki gofret üretim işlemlerine benzer. Mikro tutucunun çalışma prensibi oldukça basittir. Frekansa duyarlı LC rezonans devresi, içinden bir RF manyetik alanı geçtiğinde ısıtılır ve daha sonra ısı enerjisini aktivasyon için SHA aktüatörüne aktarır. Mikro-SHA aktüatörlerinin çoklu seçimlerini kontrol etme imkanı, aktüatörlere seçici veya eşzamanlı olarak farklı rezonans frekansları uygulayarak mümkündür (bkz. Şekil 1.6.3.1).

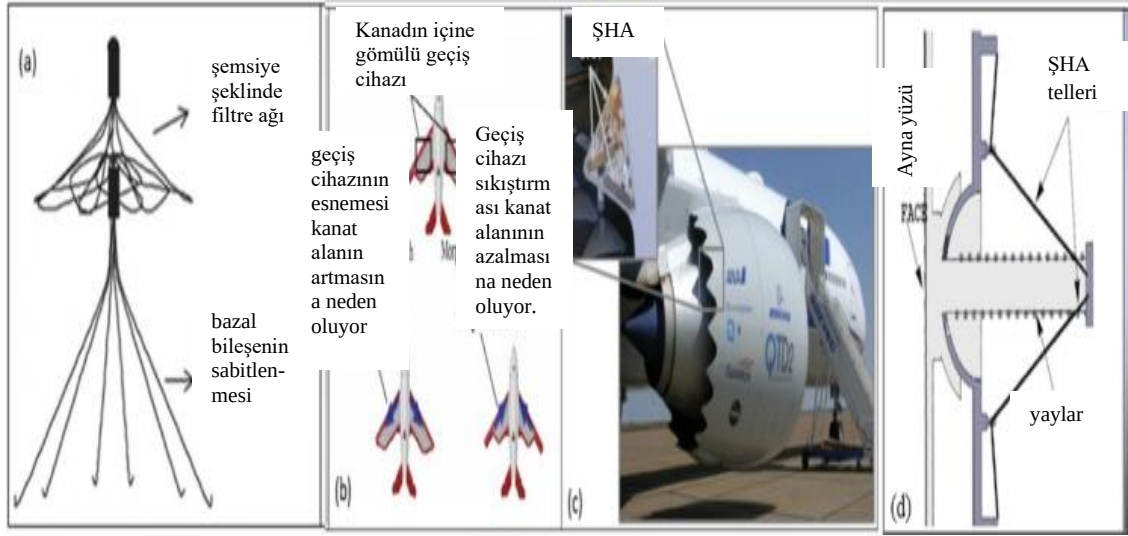
SHA'larla BATMAV (Stephen ve ark., 2013) ve Bat Robot (Colorado ve ark., 2012) gibi muhtelif uçabilen robotlar geliştirilmiştir. Son yıllarda, FestoGroup tarafından kanat açıklığı 44 cm ve uzunluğu 63 cm olan bir yusufçuk geliştirildi. Uçuş biçimi ve dayanıklılık için başının hareketlerini her iki tarafa ve kuyruğunu yukarı ve aşağı hareket etmek için dört SHA tetikleyicisi ile techiz edildi. 'BionicOpter' olarak da bilinen 'yusufçuk' 13 serbestlik derecesine sahiptir, her yöne manevra yapabilir ve havada asılı kalabilir (Festo. BionicOpter, 2013) (bkz. Şekil .1.6.3.2).



Şekil. 1.6.3.2 FestoBionicOpter – yusufçuk uçuşuna ilham kaynağı (Festo. BionicOpter 2013) .

1.6.4. Biyomedikal Uygulamaları

IVC filtreleri, venöztromboembolik hastalıklardan etkilenen hastalarda pulmonerembolinin önlenmesi için kullanılır. Son birkaç yılda, Şekil 1.6.4.1 (a) 'da gösterildiği gibi ŞHA'lar tarafından çeşitli tipte IVC filtreleri geliştirilmiştir. Oda sıcaklığında bu tip filtreler plastik olarak düz ince tel şeklinde deforme olabiliyor ve bu da küçük bir delik yardımıyla Vena cava'ya kolaylıkla yerleştirilmesini sağlıyor. Filtre yerleştirildikten sonra kanın sıcaklığını algılayarak orijinal şekline dönmesini sağlar. Trap-ease IVC filtreleri fusiform bir şekle sahiptir(Tuzak kolaylığı IVC filtreleri sigorta şeklindedir). Kan akışının hapsedildiği çift sepet tasarımı içerir ve dış destekler, filtrenin IVC duvarına sabitlenmesinde faydalıdır. Cerrahi aletler: Aort içi balon pompası kan damarlarının tıkanıklığını açmak için kullanılır. ŞHA sepetleri mesane, böbrek ve safra kanalı taşlarının çıkarılması için kullanılır. Cihaz, çapı geleneksel malzemelere göre daha küçük olan bir Nitinol tüpten oluşuyor ve burulma direncinin yanı sıra daha yüksek esneklik de sağlıyor. Laparoskopi: Nitinolden yapılmış başka bir cihazdır, kıskaç, maşa, nöbet gibi cerrahi aletler şeklinde belirli eylemleri gerçekleştirir. Yapay kaslar: Nitinol alaşımları kasların aktive edilmesinde de kullanılabilir. Özellikle yaşlılıktaki idrar kaçırma probleminde. Dolayısıyla dört Nitinol plakadan oluşan yapay üretra değeri, üretranın yapay olarak kontrol edilmesi için kullanılabilir (Mane ve ark., 2019). Değiştirilebilir bir sertlik, kemiğin daha hızlı iyileşmesine yardımcı olabilir. Nitinol ortodontik ark tellerinde, stentlerde, kılavuz tellerde, gözlük çerçevelerinde kullanılabilir.



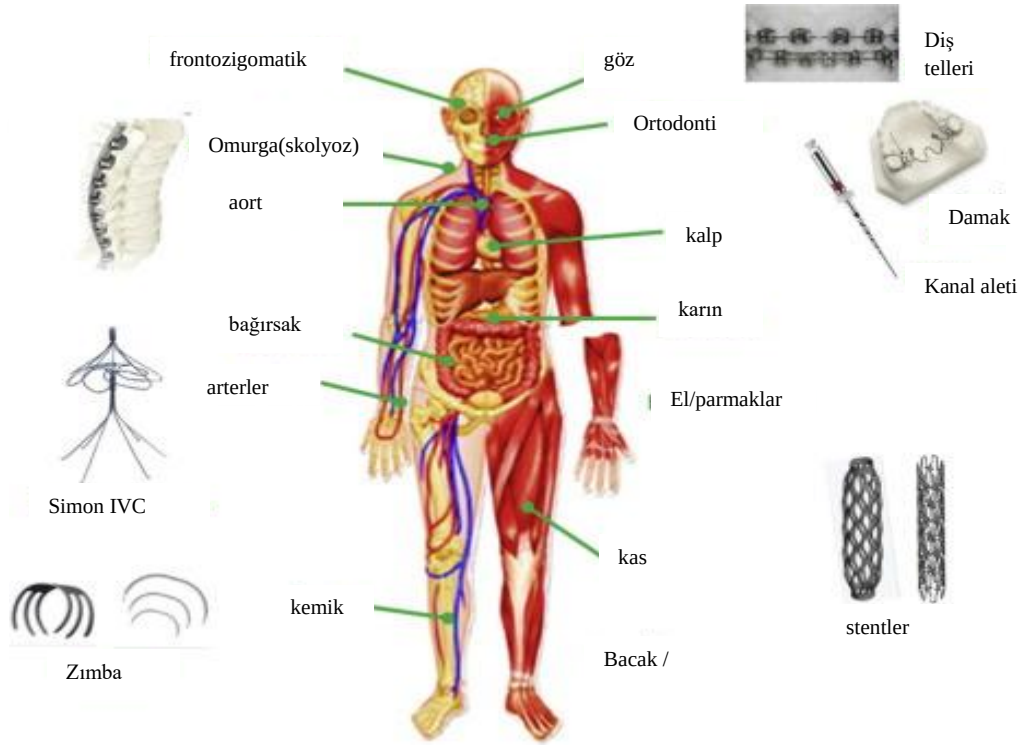
Şekil.1.6.4.1: (a) Nitinol'den yapılmış Simon vena kava filtresi, (b) kanatlarda kullanılan geçiş tekniği, (c) ŞHA değişken geometrili şerit, (d) 2-Nesil ŞHA aynası (Rajput ve ark., 2022)

1962'de Buehler ve ark. tarafından nitinoldeki ŞHE nin keşfinin akabinde, bu maddenin diş tedavisinde implantlar için kullanmasını teklif ettiler ve birkaç yıl sonra, NiTi alaşımından yapılan ilk süperelastik diş telleri Andreassen tarafından 1971'de tanıtıldı (Andreassen, 1977). ŞHA'ların minimal invaziv cerrahiye (MIS) (Song, 2010) girmesinin akabinde biyomedikal alanda mühim bir atılım yaptı ve ABD Gıda ve İlaç İdaresi (FDA) tarafından Eylül 1989'da ortopedik cerrahi için Mitek cerrahi ürününün (yani MitekAnchor) onaylanmasından sonra daha fazla biyomedikal uygulama geliştirildi ve piyasaya sürüldü.

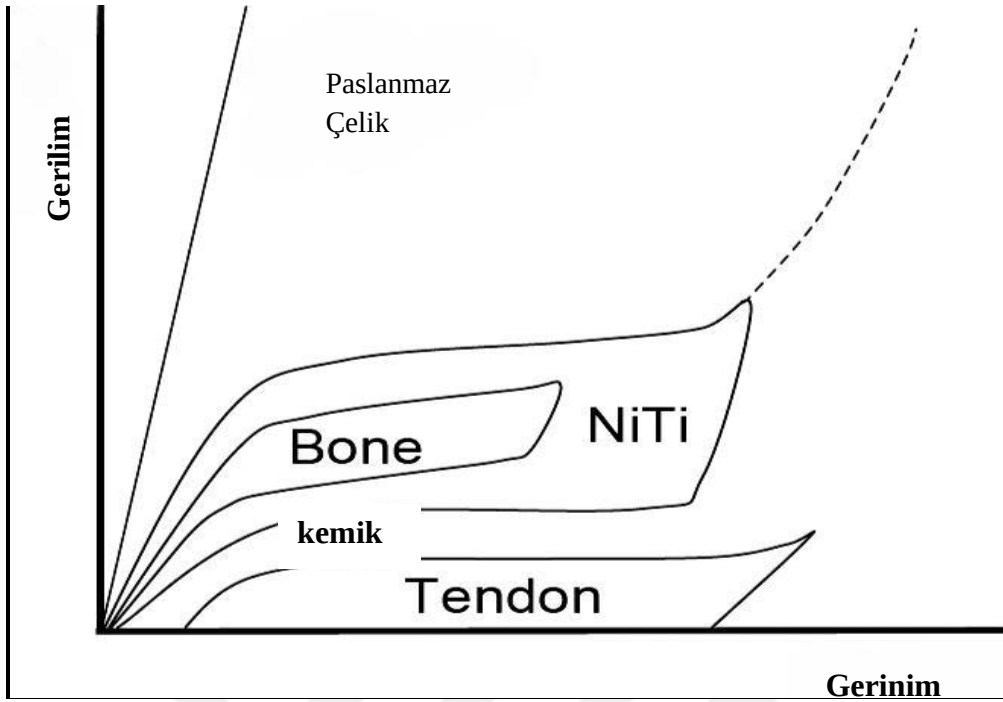
NiTi alaşımları paslanmaz çeliklerden mühim ölçüde daha masraflı olmasına rağmen, ŞHA'lar korozyon direnci yüksek (Hodgson ve ark., 1990), biyo-uyumlu (Mantovani, 2000), manyetik olmayan, insan dokularının ve kemiklerinin (Mihálc, 2001) kopyalayan benzersiz fiziksel özellikleri gibi biyomedikal uygulamalar için mükemmel davranışlar sergilemiştir (bkz. Şekil.1.6.4.1) ve insan vücudunun sıcaklığında tepki verecek ve değişecek şekilde üretilebilir (Machado&Savi, 2003). Cerrahi süreçler ve komplike tıbbi tedaviler için fonksiyonel ve doğru cihaz kullanımı için duyarlı ve emniyetli minyatür aletlere duyulan gereksinim, ŞHA'lara bu sahada daha fazla ticari başarı için mühim yararlar ve büyük imkanlar sunmaktadır. ŞHA'lar ortopedi, nöroloji, kardiyoloji ve girişimsel radyoloji dahil olmak üzere birçok alanda

tıbbi cihaz ve cihazlarda kullanılmaktadır (Morgan, 2004). ; ve diğer tıbbi uygulamalar şunları içerir: stentler (Song, 2010), forseps (tıbbi cımbızlar), dikişler, tendonu kemiğe bağlamak için çapalar, implantlar (Pfeifer ve ark., 2013), beyin damar genişlemesi (anevrizma) tedavileri, gözlük çerçeveleri ve kılavuz teller (Lim ve ark., 1996) (bkz. Tablo 1.6.4.).

Tablo 1.6.4.Biyomedikal alanda mevcut ve potansiyel ŞHA uygulamaları (Jani ve ark., 2014)



ORTODONTİK	BİYOMEDİKAL/CERRAHİ ALETLER
Diş telleri/braketler	Kateterler/tuzaklar
Damak kemerleri	Kapsamlar (Üreteroskopi, endoskopi, laparoskopi)
Dosyalar	Dikiş
ORTOPEDİK	ÇEŞİTLİ
KAFA	Kardiyoloji (Kalp)
Omurga	Hepatoloji (Karaciğer, safra kesesi, safra ağacı ve pankreas)
Kemik	
Kaslar	Kulak Burun Boğaz Hastalıkları (Kulak Burun Boğaz)
Eller/parmaklar	
Bacaklar	Gastroenteroloji (Yemek borusu, mide ve bağırsak)
DAMAR	
Aort	Üroloji (Böbrekler, böbrek üstü bezleri, üreterler, mesane, üretra ve erkek üreme organları)
Atardamarlar	
Vena kava filtresi	
VentrikülerSeptalDefekt (VSD)	Plastik, rekonstrüktif ve estetik cerrahi
Gemiler	
Vanalar	Oftalmoloji (Göz)



Şekil 1.6.4.2: Süper elastik nitinol, paslanmaz çelik, kemik ve tendon dokuları için gerilme ve gerinim ilişkisi (Morgan, 2004)

ŞHA'nın insan kemiği ve tendonlarının stres-gerilme davranışına uyan süperelastik davranışı, stent operasyonlarının sunduğu bazı zorlukların üstesinden gelmek için mükemmel bir malzeme haline getirir. ŞHA stentleri, damarlardaki kıvrımlara ve lümendeki konturlara çok daha uyumludur, oysa paslanmaz çelik stentler kan damarını düz bir şekilde zorlama eğilimindedir. Ek olarak, ŞHA'nın süperelastik histerezis davranışı, normal fizyolojik süreç sırasında ezilmeye direnebilir (radyal dirençli kuvvet sağlar) ve iyileşme sırasında damar üzerinde küçük bir dış kuvvet uygulayabilir, bu da stent uygulamaları için idealdir (bkz. Şekil 1.6.4.2). İlk ŞHA stent, 1983 yılında Dotter'in (Dotter ve ark., 1983) grubu tarafından yapıldı ve o zamandan beri dikkat çekici bir şekilde gelişti (basit sarmal tel formundan karmaşık lazer kesim yapılarına kadar), küresel pazarda büyüdü (stent ürünlerinin yaklaşık yarısı ŞHA'dan üretildi ve 6 yıla kadar 3,2010 milyar ABD dolarına ulaşması bekleniyordu (Terzo, 2006) ve insan vücudunun diğer bölgelerine kullanımı genişletti (Song, 2010).

Günümüzde kateter bazlı ameliyatlar, ameliyat travmasını daha da en aza indirecek olan MIS tedavisine olan talep nedeniyle giderek daha popüler hale gelmiştir. ŞHA'ların uygulanması, daha büyük bükülme açılarıyla doğru hareket etmek için aktif

kateter yeteneğini geliştirmiştir, bu da yeni tanı ve tedavinin tedavi edilmesini sağlar (Haga ve ark., 2000). Tung ve ark. (2008), tarafından önerildiği gibi NiTi borularından lazerle işlenmiş bir ŞHA aktüatörü, ortak düz tel veya helezon yaylı aktüatörlerle elde edilemeyen kuvvet, uzama ve boyut özelliklerine sahip özel olarak uyarlanmış ŞHA aktüatörlerinin oluşturulmasına izin verir ve yönlendirilebilir kateterler için aktüatörler geliştirmek için başka bir uygun seçeneğe yol açar.

NiTi ŞHA sarmal yaylardan üretilen bir mikro-kas lifi, Kim ve ark.(2009), tarafından, ŞHA'ların özelliklerinin çoğunu (esneklik, yüksek enerji yoğunluğu ve ölçeklenebilirlik) kullanarak, vücut deformasyonu ve hareketi için biyo-esinlenmiş bir antagonistik harekete geçirme kullanan yeni bir örgü-solucan prototipi üretmek için sunuldu ve bu, orta ölçekli uygulamalar için mükemmel bir aktüatör adayı olabilir. Benzer çalışmalar diz için aktif, yumuşak bir ortez geliştirmek için Stirling ve ark. (2011), tarafından da yapılmıştır. ŞHA yaylarının yumuşak özellikleri gerektiği gibi sağlayabilmesine ve büyük bir enerji yoğunluğu üretebilmesine rağmen; zayıf tepki süresi nedeniyle bu uygulama için uygun değildi ve harici bir güç kaynağına bağlı değilse çalıştırılması zor olacaktı. Bununla birlikte, daha yavaş zaman ölçekleri veya azaltılmış kuvvet gereksinimleri olan uygulamalar için uygun olabilir.

Shiraishi ve ark. (2007), tarafından, ventrikülün dışından yüzeye kan temas etmeden doğal kasılma işlevlerine dayanak olabilen paralel bağlantılı yapılandırılmış miyokard destek cihazına sahip bir nanoteknolojikoalent tip ŞHA lifi kullanılarak yapay bir miyokard geliştirilmiştir. Araştırmacılar, sistemlerinin eforlu kalp felci olan hastalarda ve ayrıca ventriküler fibrilasyondan iyileşmek için hayat kurtarıcı bir acil durum sırasında kalp masajında kullanılabileceği sonucuna ulaştılar. Doğuştan gelen kalp hastalıkları olan hastalarda son zamanlarda, pulmoner dolaşıma yardımcı olmak için Fontan dolaşımı için ŞHA lifleri kullanan başka bir mekanik dolaşım destek cihazı geliştirmişlerdir (Yamada ve ark., 2013).

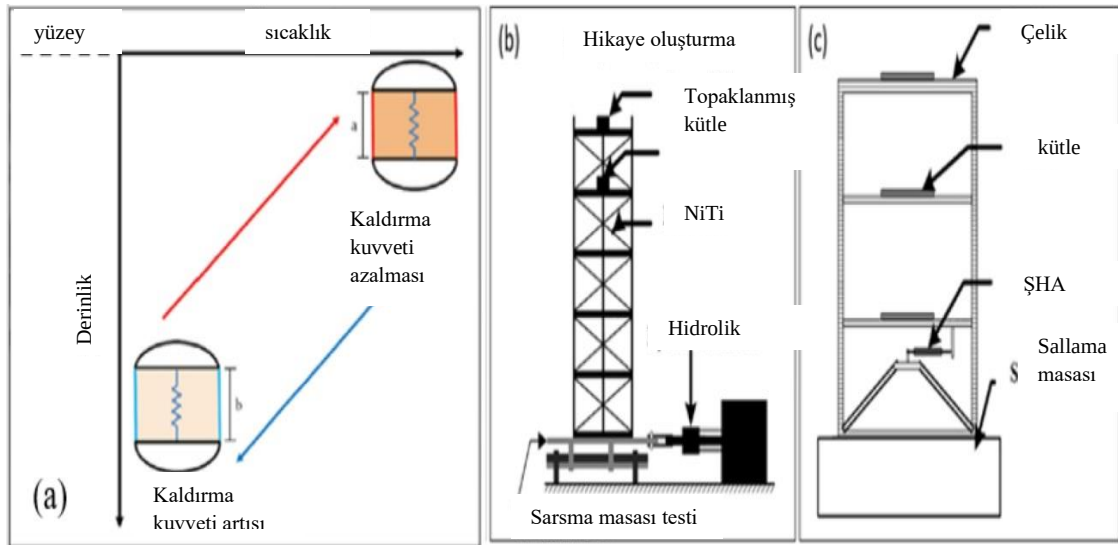
'Değiştirilebilir sertlik' implantı, kemiğin daha hızlı iyileşmesine yardımcı olabilir, böylece daha erken kilo alabilir ve takip eden bir operasyondan kaçınabilir. Şu anda, bu değişiklik sadece biyolojik olarak parçalanabilen bir implant, 'fixateurexterne' veya ikinci bir ameliyatla mümkündür. Bu nedenle, temassız ısı indüksiyonu (Pfeifer ve

ark., 2013) ile implantın sertliğini değiştirmek için NiTi-ŞHA'dan yapılmış bir 'değiştirilebilir sertlik' implantı geliştirilmiştir.

Son birkaç yılda, tıp pratisyenleri ve araştırmacılardan ŞHA materyallerinin yorgunluk ve kırık davranışı hakkında endişeler olmuştur ve bu davranışları anlamak ve gelecekte daha iyi biyomedikal uygulamalar tasarlamak için çeşitli gözlemler ve takip prosedürleri gerçekleştirilmiştir (Pelton ve ark., 2008). NiTi ŞHA'ların biyouyumluluk endişesi, nikelin bilinen toksik, alerjik ve kanserojen özellikleri nedeniyle de gündeme getirilmiş ve alternatif bir malzeme bileşimi düşünülmüştür (Pfeifer ve ark., 2013).

1.6.5 Deniz Uygulamaları

Nitinol, tersane imalat alanında iki farklı boruyu birbirine bağlamak için kullanılır. Çalışma, ısı geri kazanımlı birleştirme tekniğine dayanmaktadır. İnsansız su altı aracı, kaldırma kuvveti prensibiyle çalışıyor. Biri su üstünde, diğeri su altında olmak üzere iki farklı koşulda çalışır. ŞHA'lar bu tür yerlerde kullanılabilir ve Şekil 1.6.5 (a)'da gösterildiği gibi insansız aracın operasyonlarını gerçekleştirmek için ihtiyaca göre şekil değiştirebilir. Denizcilik uygulamalarında büyük bir potansiyele sahiptir (Angilella ve ark., 2015] .



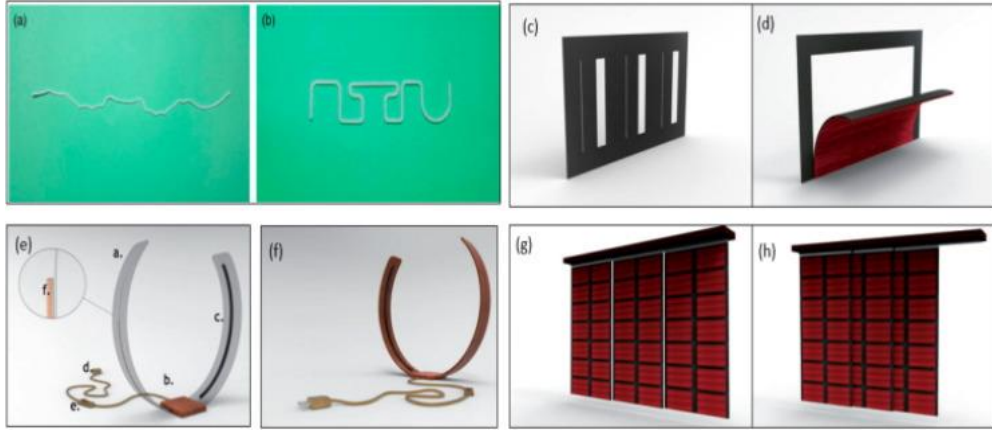
Şekil 1.6.5. (a) ŞHA'ların kaldırma kuvveti kavramı , (b) ŞHA frekans. kontrolör , (c) ŞHA damper (Angilella ve ark., 2015 ve Rajput ve ark., 2022)

1.6.6. Yapı Uygulamaları

Fe-Mn-Si ŞHA'lar yapısal uygulamalarda beton kirişleri güçlendirmek için kullanılabilir. Bunlar daha ucuzdur ve inşaat mühendisliği uygulamaları için iyi özellikler sunar. Bu aynı zamanda korozyon, yangın ve mekanik hasarlardan kaynaklanan hasarları da azaltır (Shahverdi ve ark., 2016). Şekil 1.6.4(b,c), ŞHA'ın kurulu olduğu yapıyı göstermektedir. Bu sistem elektrik akımı ile kontrol edilen ŞHA yardımıyla çalışmaktadır. Frekans kontrolörlerini kullanarak, sönümlemeye yardımcı olan artırılmış bir doğal frekans verir (Zareie ve ark., 2020).

1.6.7. Çeşitli Uygulamalar

Nitinol ısı motoru üzerine sarılarak ihtiyaca göre; hava içinden geçirilir. Mekanik güç, sıcak veya soğuk havanın türüne göre üretilir ve bu da telin ihtiyaca göre genişletilmesine yardımcı olur. ŞHA'lar güneş kollektörlerinde de kullanılabilir. Güneş ışığı yardımıyla ŞHA'ların şekli değiştirilebildiğinden ihtiyaca göre şekil değiştirecek ve güneş ışınlarını takip ederek güneş toplama verimliliğini artıracak şekilde tasarlanabilmektedir. ŞHA'lar katmanlı üretimde veya 3 boyutlu baskıda kullanılabilir. Şekil 1.6.7 (a, b) 'de gösterildiği gibi, yeni bir 4 boyutlu baskı konsepti veren duruma göre şekillerini değiştirmektedir. Süper esneklik özelliği nedeniyle telekomünikasyon antenlerinin yapımında kullanılabilir. ŞHA'lar, Şekil 1.6.7'te (c, d, g, h) gösterildiği gibi perdeleri çalıştırmak, perdeleri gündüz sıcaklığında açmak ve akşamları perdeyi otomatik olarak kapatmak gibi çeşitli ev uygulamalarında kullanılabilir. Masa lambalarında kullanılabilir, sıcaklık arttıkça Şekil 1.6.7'de (e, f) gösterildiği gibi lambayı kapatır. Günlük aktivitelerde ŞHA'lardan oluşan akıllı nesneler elektrik tasarrufu sağlayabilir ve kirliliği azaltabilir. Bu nedenle ŞHA'lar çevre dostu malzemelerin kullanılmasının bir yoludur (Costa ve ark., 2017) .



Şekil 1.6.7. (a, b) Isıtma öncesi ve ısıtma sonrası 3D baskılı ŞHA (Costa ve ark., 2017) , (c, d) perdenin orijinal durumu ve geçiş durumu (C Costa ve ark. 2017] , (e, f) masa lambası bileşeni ve geçiş durumu (Costa ve ark., 2017), (g, h) Perdelerin orijinal ve geçiş durumu (Costa ve ark., 2017).

Zorluklar

ŞHA'lar için termo-mekanik proses, toz metalurjisi ve katmanlı imalat gibi çeşitli imalat prosesleri mevcuttur. Bununla birlikte, gözenekli yapıların biyomedikal uygulamalar için uygun olması ve AM'nin en gelişmiş üretim tekniği olması gibi farklı uygulamalar için farklı özellikler gereklidir, bu nedenle ŞHA gözenekli yapının tüm parametrelerin kontrol edilerek üretilmesinin araştırılması gerekir. Karmaşık geometrinin ve farklı malzeme bileşimlerinin minimum atıkla imalatı. Ni-Ti bazlı IVC filtrenin arızalandığı, takıldıktan uzun süre sonra kırılma gözlemlendiği durumlar da vardır, bunun nedeni yorgunluktan kaynaklanmaktadır. Homojenlik ve doğrusal olmama nedeniyle Ni-Ti bazlı filtrelerin yorulma ömrünü bulmak zordur. Kişinin güvenliği ve konforunun sağlanması için bu sorunun çözülmesi gerekmektedir. Nikel insanlar için toksik bir element olduğundan, bu sorunun önlenmesi için uygun bir kimyasal bileşim kullanılarak bunun daha fazla araştırılması gerekmektedir. Nitinol bazlı ŞHA'lar daha pahalı olduğundan. Bu nedenle bakır bazlı ŞHA'lar, özelliklerini geliştirmek için farklı kimyasal bileşimlerle oluşturulan alaşımları araştırılabilir (Gautam ve ark., 2022).

1.7. Şekil Hafızalı Alaşım Uygulamalarının Gelecekteki Yönü

Mevcut çalışma, akıllı malzeme yeteneklerine sahip ŞHA'ların üretim teknikleri ve uygulamalarındaki son gelişmeleri sundu. ŞHA'ların tel formunda imalatında termomekanik teknikler tercih edilmektedir. Ancak 3D baskı, ŞHA'lar için en gelişmiş üretim tekniğidir. ŞHA'ların karmaşık geometrisi, minimum malzeme kaybıyla üç boyutlu baskı teknikleriyle kolayca üretilebilir. Seçici lazer eritme (SLE), ŞHA'ların üretimi için başlıca 3D baskı tekniğidir. ŞHA'ların biyomedikal, havacılık, otomobil, robotik, denizcilik ve inşaat mühendisliği yapılarında büyük uygulamaları vardır. ŞHA'lar aerodinamik yüklerin uçuş durumuna göre ayarlanmasına yardımcı olur. Otomobil ve havacılık parçalarının özelliklerini ve yeteneklerini geliştirmek için ŞHA'lardan oluşan çok sayıda akıllı bileşen kullanılıyor. ŞHA'ların esnekliği, robotik bir manipülatörün ellerinin şekillenmesine yardımcı olur. ŞHA'lar ile gizlilik özelliklerine sahip gelişmiş insansız su altı araçları yapılabilmektedir. İnşaat mühendisliği yapılarının başa çıkma yetenekleri ŞHA'lar ile güçlendirilmiştir. Ayrıca ŞHA'lar, güneş toplama verimliliğini artırmak için şekillerini değiştirerek ve güneş ışınlarını takip ederek güneş kolektörlerindeki uygulamalarını genişletiyor. ŞHA'ların şekil değiştirme yetenekleri 4D baskı kavramını kazandırmaktadır. Günlük aktiviteler için ŞHA'lardan oluşan akıllı nesneler elektrik tasarrufu sağlayabilir ve kirliliği azaltabilir. Bu nedenle ŞHA'lara çevre dostu malzemeler de denilebilir. Gelecekte ŞHA'ların özelliklerinin sonradan işleme, ısıtma işlemi, işlem parametrelerinin optimize edilmesi, toz bileşiminin ve dönüşüm sıcaklığının uygun seçimi ile iyileştirilmesine yönelik yöntemler araştırılabilir. Güvenilir bir teknik için sayısal modelleme, CAD ve sonlu elemanlar analizi gibi modern tasarım ve analiz kavramları da araştırılabilir (Gautam ve ark., 2022).

ŞHM'lere, özellikle de ŞHA'lara olan ticari ve araştırma ilgisi hızla artmaktadır, birçok potansiyel yeni uygulama önerilmiştir. Yeni bir fikrin başarı şansı değerlendirilebilir ve ikame, sadeleştirme ve yeni uygulamalar olmak üzere üç farklı uygulama kategorisine ayrılabilir (Humbrecht ve ark., 1991). Daha yüksek yenilik ve iyi rekabetçi fiyata sahip uygulamalar daha ilginçtir ve pazara girme şansı daha yüksektir. Piyasadaki birkaç başarılı seri üretim ŞHA uygulaması, balo altı sütüveni, cep telefonu anteni, gözlük çerçeveleri, AlfmeierPräzision AG (şimdi Actuator Solutions GmbH)

tarafından araba koltuklarındaki bel destek cihazı için geliştirilen ŞHA pnömatik valfleri ve akıllı telefonlar için Xlinea™ otomatik odaklama (AF) modülüdür. (Dynalloy, 2007). Ancak ticari açıdan başarılı ŞHA uygulamalarının yüzdeleri hala düşük kabul ediliyor. Yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımlar (YSŞHA) yüksek akma dayanımı, geniş sıcaklık aralığı faz dönüşümü ve mükemmel termal döngü kararlılığı gibi benzersiz özellikler sergiler. Bu nedenle araştırma ve uygulama için geniş beklentilere sahiptir. TiVAI alaşımı, ŞHA teknolojilerinde önemli bir yere sahip bir malzemedir. TiVAI yüksek performanslı bir alaşım olarak, özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları ve biyomedikal alanlarda dikkat çekmektedir. Gelecekte, TiVAI alaşımlarının kullanımı, tıbbi uygulamalarda ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda özellikle havacılık uygulamalarında artış gösrecektir (Fu ve ark., 2023).

2.MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında incelenen numuneler, daha önce yürütülen bir BAP projesi kapsamında üretilmiş olup bu numunelere ait faz dönüşüm sıcaklıkları, mikroyapı analizleri ve x-ışını kırınım analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu ön analizler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, sunulan tezde yüksek sıcaklık şekil hafızalı Ti-15V-xAl (x: 2, 4 ve 6) (ağ. %) alaşımlarının mekanik (akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma dayanımı, kopma uzama miktarı vb) ve şekil hafıza özellikleri belirlenmiştir. Alaşımların mekanik özelliklerini belirlemek adına tek eksenli çekme testi kullanılmıştır.

2.1. Çekme Testi için Numunelerin Hazırlanması

Tek eksenli çekme testinde, standartlara uygun olarak hazırlanmış Ti-15V-xAl (x: 2, 4, 6) (ağ. %) alaşımları 0,5m/s sabit hızla artan bir çekme kuvveti uygulandı. Uygulanan eksenel kuvvet ile bu kuvvetin uygulanması sonucu numunenin boyunda meydana gelen uzama deney cihazı tarafından sürekli olarak kaydedilerek, kuvvet/uzama eğrileri elde edildi. Kuvvet/uzama eğrilerinden mühendislikte daha kabul gören gerilme/% uzama grafikleri çizildi. Elde edilen grafiklerden alaşımlara ait akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma dayanımı ve kopma uzama özellikleri belirlendi. Tek eksenli çekme testi Gaziosmanpaşa Üniversitesi Diş hekimliği Fakültesinin araştırma laboratuvarında gerçekleştirildi.

2.2. Çekme Testi

Malzemenin mekanik özelliklerini öğrenmek için çekme deneyi yaygın olarak kullanılır. Bu deneyden elde edilen veriler mühendislik hesaplamalarında doğrudan kullanılmaktadır (KSÜ, 2017). Tek eksenli çekme testi teknik uygulamalarda kullanılır. Malzemenin elastisite (E) (Young) modülü, akma dayanımı (σ_a), kopma(çekme) dayanımı (σ_{ϵ}) gibi mukavemet değerleri; kopma uzaması, kopma büzülmesi ve tokluk gibi süneklik değerleri mekanik çekme testi ile belirlenir (Gürbüz &Çevik, 2013).

Belirli bir yük altında malzemelerin mekanik davranışı çekiş özellikleri önemlidir (ASM Book, 2004).



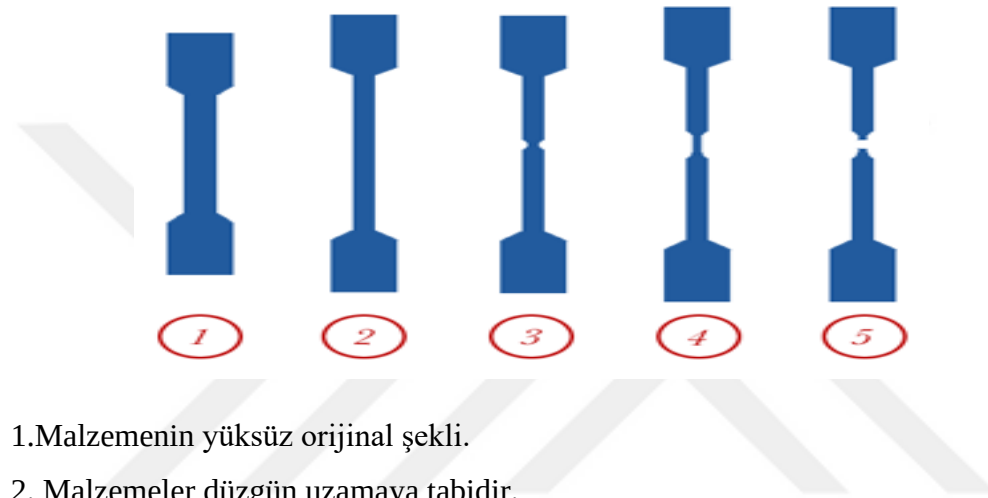
Şekil 2.1 Tek eksenli çekme test cihazı

Video Ekstensometre

Bir cismin uzunluğundaki büyük-küçük değişimleri ölçmek için kullanılan cihaza Ekstensometre denir. Bu cihaz, numune üzerine iliştirilen mekanik ekstensometreler veya numuneye bağlanan straingaugesler kullanılarak gerilme-birim şekil değiştirmeyi ölçebilir. Video ekstensometre cihazı, test esnasında bilgisayara bağlı dijital video kameralar aracılığıyla örnek üzerinden sürekli görüntü alarak malzemelerin gerilme/birim şekil değiştirme ölçümlerini yapar. Teste tabi tutulan malzemeye ait numune çekme basma durumundayken kaydedilen görüntülerde bu işaretler arasındaki piksel mesafesi sabit bir şekilde video kamera tarafından takip edilir. Piksel mesafeleri ölçülerek doğru bir birim şekil değiştirme ölçümü değeri alınır. Doğru

bir kalibrasyon ve iyi bir görüntü algoritması ile bir mikrometreden çok daha düşük seviyede çözünürlük elde edilebilir (KSÜ, 2017).

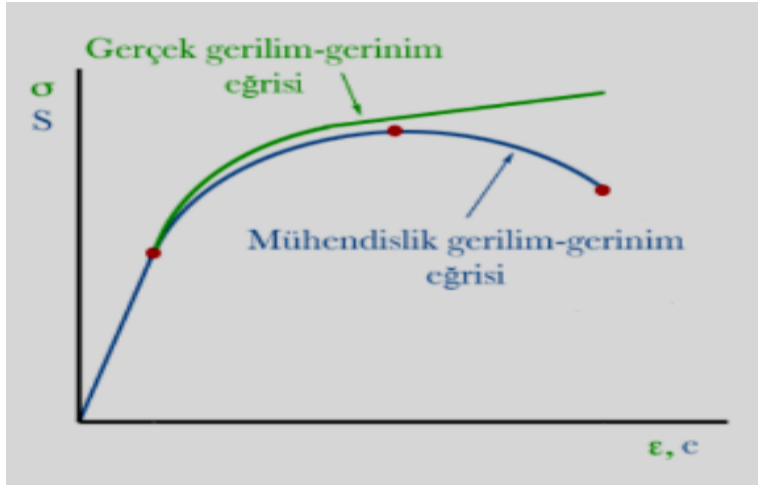
Şekil 2.1’ deki tensile test makinesine numune yerleştirilir. Yavaş darbesiz sabit hızla artan kuvvetle numune tek eksenle çekilir. Numunede çekme sırasında şekil 2.2’deki değişimler oluşur.



1. Malzemenin yüksüz orijinal şekli.
2. Malzemeler düzgün uzamaya tabidir.
3. Boyun kesi yeri(plastik deformasyon oluşur).
4. Boyun verme(sünekliği)
5. Malzemenin kırılması(kopma uzunluğu)

Şekil. 2.2 Çekme testinde numunenin aşamaları (Mikell P Groover 2004)

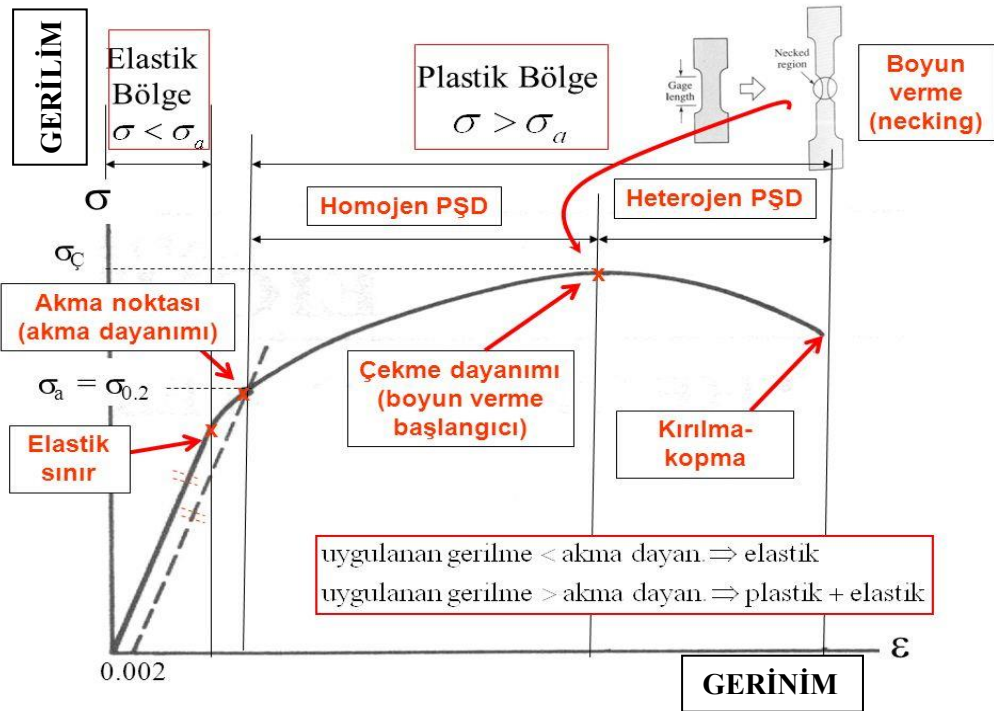
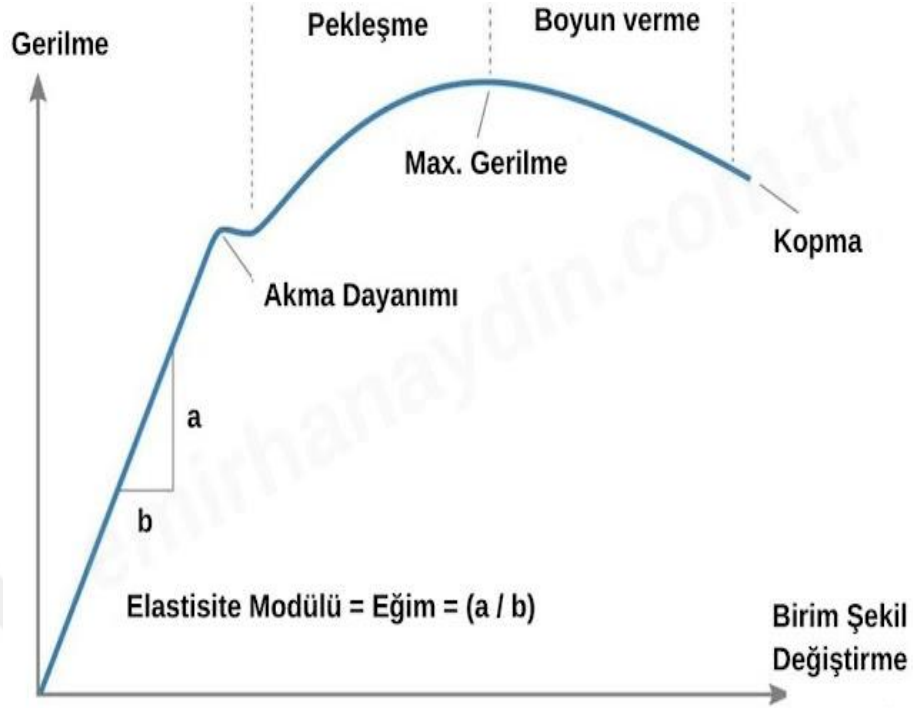
Bu deney sonucunda kuvvet (F) ve uzama (ΔL) eğrisi elde edilir. Ancak daha kabul gören Gerilme-Uzama eğrisidir. Bu sebeple uygulanan kuvvet, numunenin ilk kesit alanına bölünerek($\sigma = F/A_0$), kuvvet verileri gerilme verilerine çevrilir ve Gerilme-Uzama grafiği elde edilir.



Şekil 2.3 Mühendislik eğrisi ve gerçek gerilme eğrisi

Şekil 2.4 Mühendislik gerilim- gerinim eğrisinde eğrisinde uygulanan kuvvet numunenin ilk kesit alanına bölünerek elde edilir ($\sigma = F/A_0$). Gerçek mühendislik eğrisi ise uygulanan kuvvetin kuvvet uygulandığı andaki kesit alanına bölünerek elde edilir ($\sigma = F/A$). Birim uzama ϵ ise deney sürecinde boyda oluşan değişimin ilk boya oranıyla elde edilir.

Bu grafik az karbonlu çeliklerde (yumuşak çeliklerde) akma bölgesinde dalgalanma şeklinde ortaya çıkarken, çok karbonlu çeliklerde (sert çeliklerde) düz bir hat olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle sert çeliklerde akma bölgesini gözle tespit etmek zor olduğu için elastik bölge çizgisi % 0,2 ötelenerek ana çizgiyi kestiği nokta akma noktası olarak kabul edilir (KSÜ, 2017).



Şekil 2.4 Çekme testi verileri grafik yorumlama

Elastisite Modülü (E): Numunenin mukavemetinin ölçüsüdür. Birim uzama ile normal gerilme (çekme ya da basma gerilmesi) arasındaki doğrusal ilişkinin bir sonucu olup

birim uzama başına gerilme olarak tanımlanır. Birim uzama ile normal gerilme (çekme ya da basma gerilmesi) arasındaki doğrusal ilişki şöyle tanımlanabilir:

$$E = \sigma / \epsilon \quad (2.2.1)$$

Numuneye çekme kuvveti uygulandığında, malzemede meydana gelen uzamalar elastik sınırlar içinde gerilmelerle orantılıdır. Buna “Hooke Kanunu” adı verilmektedir. Elastisite modülü malzemeye ait ayırtedici bir özelliktir. Bu değer atomlar arasındaki bağ kuvveti ve kafes yapısı ile ilgilidir.

Çekme Dayanımı: Çekme grafiğindeki maksimum gerilmedir.

Gerilme (σ): Birim alana etkiyen yük anlamına gelir ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\sigma = F/A_0 \quad (2.2.2)$$

Birim Şekil Değiştirme (ϵ): Numuneye kuvvet uygulandığında oluşan boy değişiminin kuvvet uygulanmadan önceki ilk boy oranı.

$$\epsilon = \Delta L/L_0 \quad (2.2.3)$$

Akma Dayanımı (σ_a): Uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit kalmasına rağmen, plastik şekil değiştirmenin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzensizlik gösterdiği kısma karşı gelen gerilme değeridir.

$$\sigma_a = F_a/A_0 \quad (2.2.4)$$

Bazı malzemelerde gerilmenin başladığı gerilme değeri eğriden kolaylıkla görülür. Ancak akma noktasının belirgin olmadığı durumlarda belirli bir miktar kalıcı uzamanın olduğu metallerde % 0,2 değeri alınır.

Çekme Dayanımı (σ_{ζ}): Bir malzemenin kopuncaya veya kırıluncaya kadar dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. Bu gerilme, çekme diyagramındaki en yüksek gerilme değeri olup, aşağıdaki formül ile bulunur.

$$\sigma_{\zeta} = F_{max}/A_0 \quad (2.2.5)$$

Kopma Gerilmesi (σ_k): Numunenin koptuğu andaki gerilme değeridir.

$$\sigma_k = F_K / A_0 \quad (2.2.6)$$

Yüzde Kopma Uzaması (KU): Çekme numunesinin boyunda meydana gelen en yüksek yüzde plastik uzama oranı olarak tanımlanır. Çekme deneyine tabi tutulan numunenin kopan kısımlarının bir araya getirilmesi ile son boy ölçülür ve boyda meydana gelen uzama

$$\Delta L = L_k - L_0 \quad (2.2.7)$$

bağıntısı ile bulunur. Burada L_0 numunenin ilk ölçü uzunluğunu, L_k ise numunenin kırılma anındaki boyunu gösterir. Kopma uzaması ise;

$$KU (\%) = (\Delta L / L_0) \times 100 \quad (2.2.8)$$

bağıntısıyla belirlenir. Bu değer malzemenin sünekliğini gösterir (YTÜ, 2023).

Gerilim-gerinim eğrisinde F_{max} ın F_{kopma} dan daha büyük çıkmasının sebebi zamanla azalan kesit alanıdır. Sürekli azalan kesit alanından dolayı numune dayanabileceğinden daha düşük bir yükte kopar (YTÜ, 2023).

Gerçek Gerilme Gerinme Değeri: Gerilme; numuneye uygulanan F kuvvetinin kesit alanına bölünmesiyle ortaya çıkan değerdir. Çekme deneyi sırasında kesit alanı sürekli olarak değişim gösteriyorsa gerilme tam olarak ölçülemez. Deney sırasında numune boyun vermeye başlayınca gerilmede bir azalma, genlemede ise bir artma söz konusudur. Bu esnada gerilme değeri maksimum değerine ulaşmıştır. Numune ilk olarak boyun verdiği anda gerilme değeri, gerçek gerilme değerinin altında kalır (YTÜ, 2023).

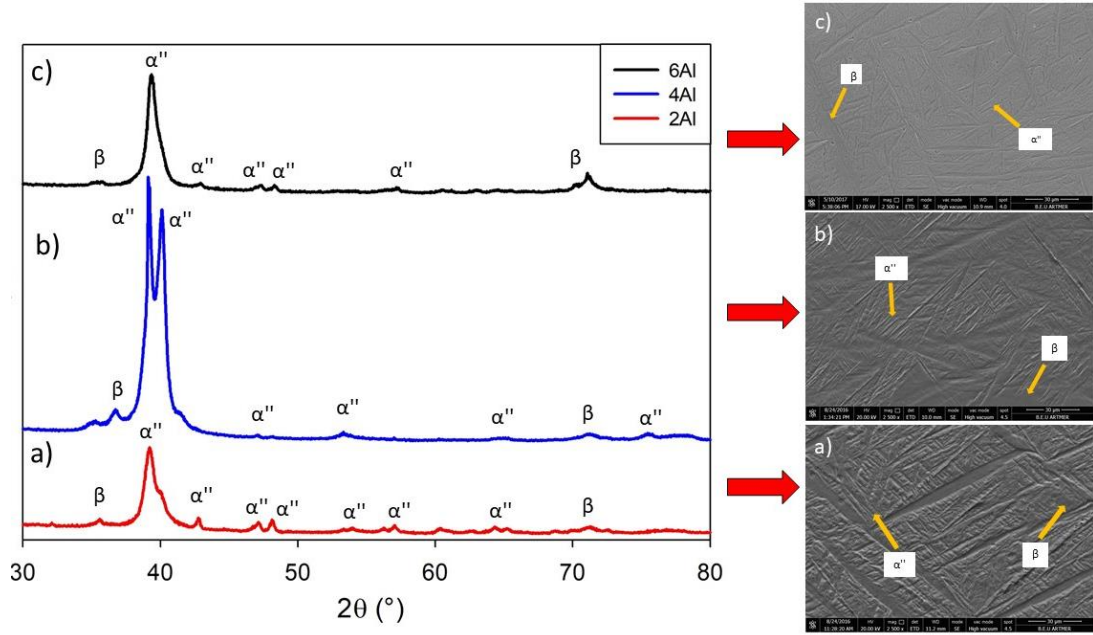
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Sunulan tezde, ark-eritme tekniği ile daha önce BAP kapsamında üretilen Ti-15V-xAl (x: 2, 4 ve 6) (ağ.%) alaşımlarının mekanik karakterizasyonu (akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma dayanımı, kopma uzama miktarı vb.) tek eksenli çekme cihazı ile incelendi. Alaşımların mekanik analizleri oda sıcaklığında ve 0.5m/s yükleme hızında alındı. Üç farklı numuneye ait akma gerilmesi, çekme gerilmesi, kopma gerilmesi ve kopma uzama değerleri ve elastik modülü grafiklerden belirlendi. Al içeriğinin değişimine bağlı olarak mekanik özellikleri karşılaştırıldı.

Bu tez kapsamında alaşımlara ait daha önce yapılan mikroyapısal ve termal analizler ile birlikte faz geçişleri, alaşımların yapısal özelliklerini ayrıntılı bir şekilde ortaya koyarak, bu malzemeleri tanımamıza olanak sağlamıştır (Ergen, 2022). DSC analizlerinden elde edilen faz dönüşüm sıcaklıkları Tablo 1 de verilmektedir. Şekil 3.1 de taramalı elektron mikroskop görüntüleri (SEM) ve x-ışını kırınım (XRD) grafikleri birlikte verilmiştir. Malzemelerin mikroyapısı ve faz özellikleri hakkında elde edilen bu bilgiler ışığında, tez çalışmasında sunulan çekme testi sonuçları ilişkilendirilerek alaşımların mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Tablo 3.1. Ti-15V-xAl (x: 2,4 ve 6) alaşımlarına ait ters martensit (ostenit) dönüşüm sıcaklıkları

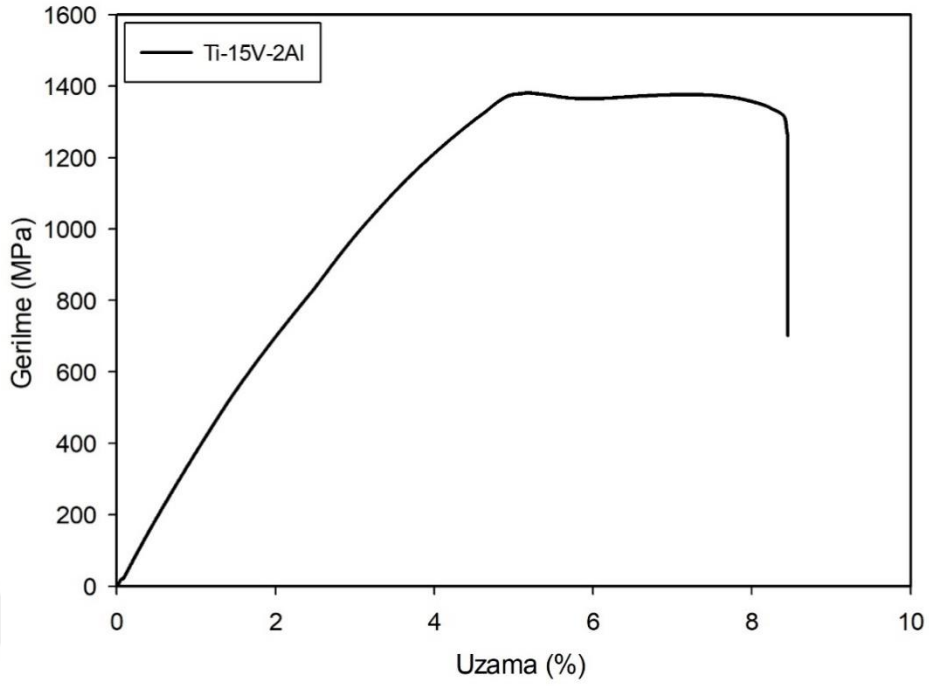
Alaşım	As (°C)	Af (°C)
Ti-15V-2Al	140	280
Ti-15V-4Al	170	320
Ti-15V-6Al	250	340



Şekil 3.1. XRD grafikleri ve SEM görüntüleri a) Ti-15V-2Al b) Ti-15V-4Al c) Ti-15V-6Al

Tablo 3.1 dikkate alındığında alaşımların ostenit (ters mastensitik) dönüşüm gösterdiği ve ostenit dönüşüm sıcaklıklarının Al içeriği ile birlikte azaldığı görülmüştür. Oda sıcaklığında alınan SEM görüntülerinden ise alaşımların mikroyapısında β ostenit fazı ile birlikte iğnemsî yapıda α' martensit fazının varlığına rastlanmıştır. 4Al içerikli alaşımda martensit fazların yoğunluğunun daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte yine daha önce alınan XRD analizlerinden, alaşımlarda bir miktar β ostenit fazına ve α' martensit fazına ait piklerin varlığına rastlanmış ve tespit edilen fazların SEM analizlerinde gözlenen fazlar ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. (Ergen, 2022)

Şekil 3.2 de Ti-15V-2Al alaşımlarının oda sıcaklığındaki gerilim-uzama eğrisi verilmektedir. Gerilim-uzama grafiği dikkate alındığında akma dayanımının 760 MPa, çekme dayanımının 1380 MPa ve kopma dayanımının 1285 MPa olduğu görülmektedir. Kopma dayanımına karşılık gelen maksimum uzama % 8.4 dür. Alaşıma ait elastik modülü 38 GPa dır.

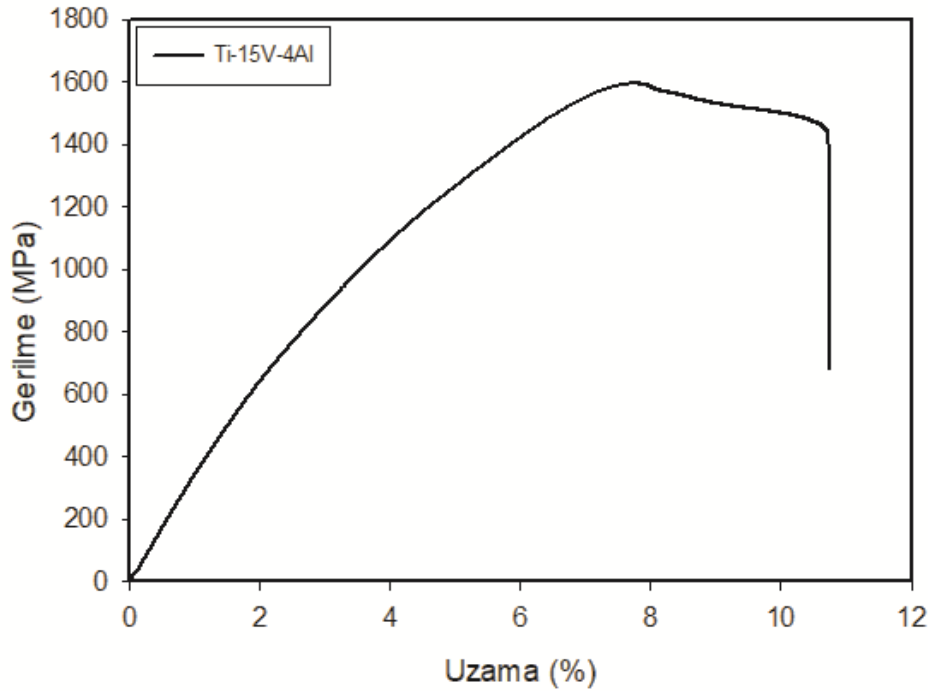


Şekil 3.2. Ti-15V-2Al alaşımına ait gerilme / uzama grafiği

Ti-15V-2Al alaşımın çekme dayanımı literatürde çalışılan pekçok TiVAl alaşımlarına kıyasla daha yüksektir ve bu, mikroyapıda görülen α'' ve β fazlarının homojen dağılımına ve tane boyutuna atfedilir (Smith ve ark., 2020; Lee ve Kim, 2018). Mikroyapıda α'' martensitik fazın varlığı, mukavemeti artırırken, Al oranının düşük olması sınırlı bir sertleşme mekanizması ile açıklanabilir. Literatürde, Al ilavesinin Ti alaşımlarında dislokasyon hareketlerini sınırlandırdığı ve tane sınırlarını güçlendirdiği bilinmektedir (Zhou ve ark., 2018). Ancak % 2 Al içeriği, dislokasyonların hareketini sınırlandıracak kadar yeterli sertleşme mekanizmasını sağlamamaktadır. Bu durum, martensitik fazın stabilize olmasından kaynaklanan çekme dayanımı artışına rağmen, maksimum uzama değerinin (% 8.4) orta seviyede kalmasıyla doğrulanmaktadır. Wang ve ark. (2020), düşük Al içeriğine sahip Ti-V alaşımlarında, martensit fazın varlığının mukavemet artırıcı bir faktör olduğunu, ancak tane boyutunun bu aşamada belirleyici rol oynadığını bildirmiştir.

Şekil 3.3 de Ti-15V-4Al alaşımına ait gerilme/uzama grafiği verilmiştir Ti-15V-4Al alaşımında mekanik dayanımda belirgin bir değişim gözlenmiştir. Ti-15V-4Al alaşımında, çekme dayanımı 1604 MPa ve kopma dayanımı 1440 MPa değerine artarken, akma dayanımı 690 MPa seviyesine düşmüştür. Çekme dayanımındaki

belirgin artış, Al ilavesinin faz yapısını güçlendirmesiyle ilişkilidir. Ti-15V-4Al alaşımında Al miktarının artması, β fazın stabilitesini artırırken, çekme sırasında oluşan stres altında daha fazla β fazın martensite dönüşmesine olanak sağlar. Bu dönüşüm, deformasyon sırasında faz sınırlarında stres absorpsiyonu ve çatlak ilerlemesini yavaşlatır. Martensit dönüşümünün yoğunluğu ve martensit fazların yeniden yönlendirilmesi sayesinde malzeme daha yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşır, bu da çekme ve kopma dayanımını artırır (Christian ve Mahajan, 1995; Bhattacharya, 2003).

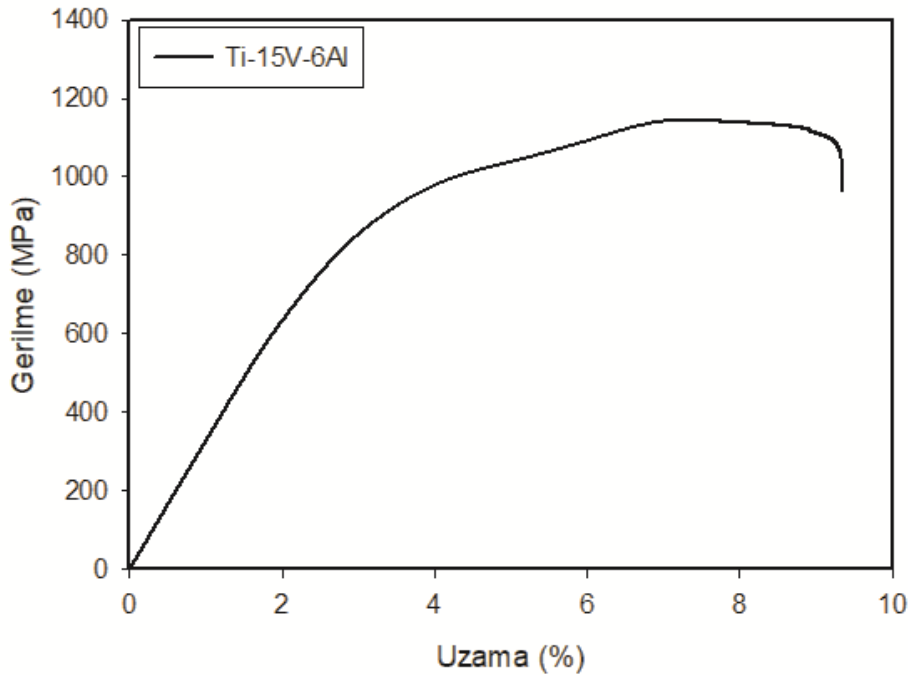


Şekil 3.3. Ti-15V-4Al alaşımına ait gerilme/uzama grafiği

Ağırlıkça % 4Al içeren Ti-15V alaşımının maksimum uzama miktarı, Ti-15V-2Al alaşımına kıyasla yaklaşık % 11' e çıkmıştır. Al miktarının artması, β faz içindeki martensitik dönüşüm yoğunluğunu artırarak deformasyon sırasında enerji absorpsiyonunu optimize eder ve malzemenin daha fazla uzamasını sağlar ve alaşımın sünekliğini artırır. (Otsuka ve Ren, 2005). Akma dayanımı ise 690 MPa' a düşmüştür. Akma dayanımındaki azalma ise, Ti-15V-4Al alaşımında β fazın daha stabil hale gelmesiyle ilişkilidir. Daha stabil β faz, dislokasyon hareketine karşı daha düşük direnç gösterir ve martensit faz dönüşümünün daha geç başlamasına neden olur. Bu,

deformasyonun ilk aşamalarında malzemenin daha kolay şekil değiştirmesine yol açarak akma dayanımının Ti-15V-2Al alaşımına göre azalmasına neden olur. Ayrıca, Al miktarının artmasıyla mikro yapıda ortaya çıkan faz dengesi, malzemenin plastik deformasyona daha yatkın olmasını sağlar. (Banerjee ve Williams, 2013).

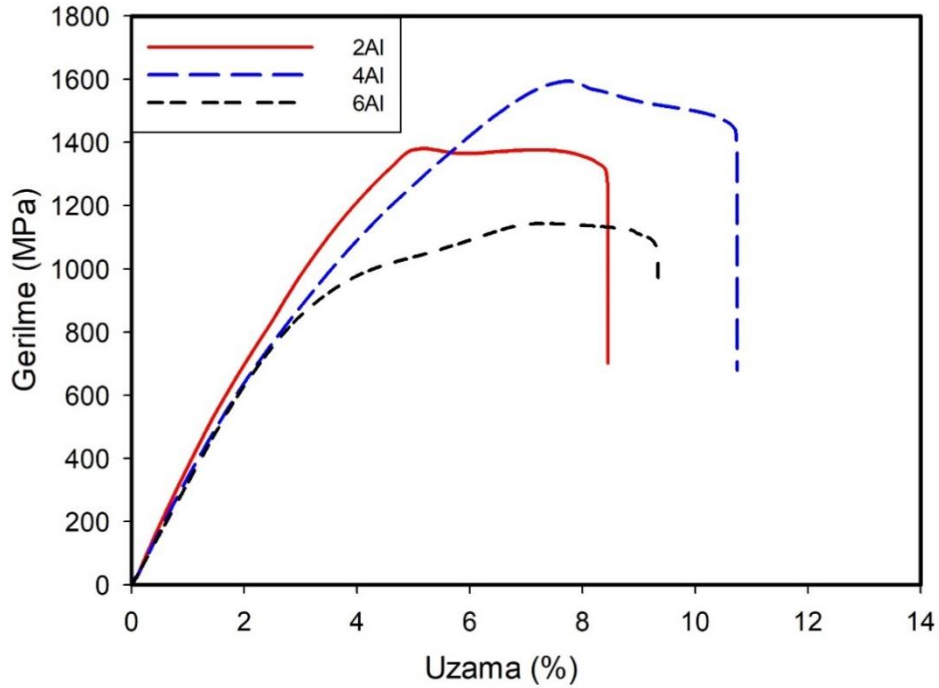
Şekil 3.4 de Ti-15V-6Al alaşımına ait tek eksenli çekme testi sonucu alınan gerilme uzama grafiği verilmiştir. Gerilme uzama grafiğinden alaşımın maksimum akma dayanımı ve çekme dayanımı 780 MPa ve 1150 MPa'dır. Alaşıma ait maksimum uzama ise yaklaşık % 9 dur. Kopma dayanımı ise 1060 MPa'dır. Elastik modülü 32 GPa dır. Ti-15V-6Al alaşımında Al içeriğinin artışı ile birlikte iç gerilmelerin mekanik özellikleri olumsuz etkilediği görülmektedir. Çekme dayanımı (1150 MPa) ve kopma dayanımı (1060 MPa) değerlerindeki düşüş, Al ilavesinin belirli bir seviyeden sonra çökelme fazlarını ve iç gerilim dağılımını kontrolsüz hale getirdiğini göstermektedir. Zhang ve Li (2019), Ti-V-Al alaşımlarında % 6 Al seviyesinde dislokasyon hareketlerinin daha fazla sıkışma yaşadığını ve bu durumun mekanik performans üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ifade etmektedir. Mikroyapısal incelemeler, bu seviyede tane sınırlarında faz kararsızlıklarının meydana geldiğini ve martensit fazın enerji bariyerlerinin artarak stabilize olamadığını göstermektedir.



Şekil 3.4.Ti-15V-6Al alaşımına ait gerilme / uzama (%) grafiği

Ti-15V-6Al alaşımında Al miktarının artışı, β fazın daha fazla stabilizasyonuna neden olur. β fazın daha kararlı hale gelmesi nedeniyle martensitik dönüşümden kaynaklanan süneklik kaybolur. Bu, Ti-15V-6Al alaşımında plastik deformasyon kapasitesinin azalmasına yol açar, uzama değeri düşer (Christian ve Mahajan, 1995). Maksimum uzama değerinin %9 olarak ölçülmesi, faz dengesizliğinden kaynaklanan kırılđanlık artışını doğrulamaktadır. Yüksek Al içeriği, dislokasyon hareketini kısıtlayan daha güçlü etkiler oluşturur ve beta fazın elastik deformasyon direncini artırır. Bu durum, Ti-15V-6Al alaşımında daha yüksek bir akma dayanımı sağlar. (Otsuka ve Ren, 2005). Daha yüksek Al içeriği, beta fazın elastik davranışını değiştirerek daha düşük bir elastik modül oluşturur. Bu, atomlar arası bağların Al katkısıyla değişim göstermesi ve beta fazın deformasyona daha yatkın hale gelmesiyle ilişkilidir. (Kim ve Hosoda, 2004).

şekil 3.5 de, Ti-15V-xAl (x: 2, 4 ve 6) alaşımlarının gerilim-uzama eğrileri birlikte verilmiştir. Grafik dikkate alınığında farklı mekanizmalara karşılık gelen üç aşamadan oluştuğu görülmektedir: elastik deformasyon, martensit varyantlarının yeniden yönlendirilmesi ve stres etkili martensit oluşumu.



şekil 3.5 Ti-15V-xAl (x: 2; 4 ve 6) alaşımlarına ait gerilme /uzama grafiği

Tablo 3.2 de Ti-15V-xAl (x: 2; 4 ve 6) alaşımlarına ait gerilme uzama grafiklerinden elde edilen mekanik özelliklere ait değerler verilmektedir. Şekil 3.5 ve Tablo 3.2 birlikte değerlendirildiğinde, 4Al içerikli numunenin mekanik özelliklerinin, 2Al içerikli numuneye göre belirgin değişiklikler gösterdiği görülmektedir. 4Al içerikli numunenin çekme dayanımı 2Al içerikli numuneye göre yaklaşık %16 artmıştır, bu da malzemenin kopma noktasına kadar daha fazla gerilme taşıyabileceği anlamına gelmektedir. Kopma dayanımında da benzer bir artış görülmüş, 2Al içerikli numuneye kıyasla yaklaşık %12 daha yüksek kopma dayanımı göstermiştir. Maksimum uzama değeri açısından ise, 2Al içerikli numuneye göre yaklaşık % 28 oranında daha fazla uzama göstermiştir. Bu durum malzemenin sünekliğinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Akma dayanımı ise, 2Al içerikli numuneye göre yaklaşık % 9 azalmıştır. Bununla birlikte, elastik modülü değeri de yaklaşık %10 oranında azalmıştır. Bu, 4Al içeriğinin malzemenin rijitliğini bir miktar azalttığını ifade etmektedir.

Tablo 3.2. Ti-15V-xAl (x: 2; 4 ve 6) alaşımlarına ait mekanik özellikler

Alaşım	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Young Modülü (GPa) (Elastik Modülü)
Ti-15V-2Al	760	1380	1285	8.4	38
Ti-15V-4Al	690	1604	1440	10.8	34
Ti-15V-6Al	780	1150	1060	9.3	32

6Al içerikli numunenin mekanik özellikleri, 4Al içerikli numuneye kıyasla bazı belirgin değişiklikler göstermiştir. Akma dayanımı yaklaşık %13 artmıştır, bu da artan Al içeriğinin dislokasyon hareketlerini kısmen zorlaştırarak malzemenin elastik deformasyon öncesindeki dayanımını artırdığını göstermektedir. Ancak, çekme dayanımı yaklaşık % 28 oranında azalmıştır, bu da artan Al içeriğinin malzemenin kopma noktasına kadar olan dayanımını düşürdüğünü göstermektedir. Kopma dayanımı da benzer şekilde %26 oranında azalmış, bu da malzemenin nihai dayanımının önemli ölçüde düştüğünü ortaya koymuştur. Maksimum uzama değerinde ise yaklaşık %14'lük bir azalma gözlemlenmiştir, bu da malzemenin sünekliğinde bir kayıp olduğunu

göstermektedir. Son olarak, elastik modül yaklaşık %3 oranında azalmıştır, bu da malzemenin rijitliğinde hafif bir düşüş olduğunu ifade etmektedir. Al ilavesinin belirli bir seviyeyi aşması, çökme fazlarının ve iç gerilim dağılımının düzensizleşmesine yol açtığını göstermektedir. Artan Al içeriği, malzemenin sünekliği ve çekme dayanımı üzerinde olumsuz, akma dayanımı üzerinde ise olumlu bir etkiye neden olmuştur.

Akma dayanımı açısından, Ti-15V-6Al (780 MPa) en yüksek değeri gösterirken, çekme ve kopma dayanımı bu alaşım için daha düşüktür (sırasıyla 1150 ve 1060 MPa). Maksimum uzama değeri ise Ti-15V-4Al için en yüksek (% 10.8), Ti-15V-2Al ve Ti-15V-6Al için daha düşüktür (% 8.4 ve % 9.3). Bu, Ti-15V-4Al'ın dengeli bir mekanik dayanım ve deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Young modülü (elastik modül) değerleri Ti-15V-2Al'da en yüksek (38 GPa), Ti-15V-6Al'da ise en düşük (32 GPa) olarak ölçülmüştür. Elastik modülün düşmesi, artan alüminyum içeriğiyle sertlikteki azalmanın bir işareti olabilir. Ti-15V-2Al alaşımında 38 GPa olarak ölçülen elastik modül, sertlik ve esneklik arasında bir denge sunmaktadır. %4 Al seviyesinde elastik modül 34 GPa'a düşmüş, bu da alaşımın daha esnek hale geldiğini göstermiştir. Ancak %6 Al seviyesinde elastik modül 32 GPa olarak ölçülmüş ve artan iç gerilmeler nedeniyle mekanik stabilitenin azaldığı anlaşılmıştır. Li ve ark. (2017), elastik modül değerlerinin Al içeriğine bağlı olarak değişim gösterdiğini ve yüksek Al içeriğinin faz dengesizliği yaratarak elastik özelliklerde bozulmaya yol açtığını belirtmiştir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, Ti-15V-4Al alaşımı, çekme dayanımı (1604 MPa), kopma dayanımı (1440 MPa) ve uzama kapasitesi (% 10.8) açısından en iyi performansı sunmaktadır. Bu, Ti-15V-4Al alaşımını optimum mekanik özellikler gerektiren uygulamalar için daha uygun hale getirir. Örneğin, biyomedikal implantlarda ya da havacılık sektöründe, dayanıklılık ve sünekliğin aynı anda kritik olduğu durumlarda kullanılabilir. Ti-15V-6Al ise yüksek dönüşüm sıcaklıkları nedeniyle ısıya dayanıklı uygulamalarda tercih edilebilir, ancak düşük çekme dayanımı ve kopma dayanımı bu kullanım alanlarını sınırlayabilir. Ti-15V-2Al ise genel olarak daha yüksek elastik modülü ile hassas yapı elemanları için düşünülebilir.

4.SONUÇLAR

Sunulan tez çalışmasında ark eritme tekniği ile üretilmiş Ti-15V-xAl (x:2, 4 ve 6) (% ağırlıkça) alaşımlarının mekanik özellikleri tek eksenli çekme testleri ile incelendi. Ti-15V alaşımına Al ilavesinin alaşımın mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırıldı. Oda sıcaklığında ve 0.5m/s yükleme hızında alınan çekme testlerinden alaşımlara ait akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma dayanımı değerleri tespit edildi. Maksimum uzama ve elastik modülü değerleri bulundu. Alaşımın mekanik özelliğini artıran optimum Al ilavesi tespit edildi ve literatür ile karşılaştırılması yapıldı ve karşılık gelen sonuçlar aşağıda özetlendi.

1. Ti-15V-4Al alaşımı, Ti-15V-2Al ile karşılaştırıldığında çekme dayanımında %16 ve kopma dayanımında %12 artış gösterirken, akma dayanımında %9 azalma ve elastik modülünde %10 azalma görüldü. Maksimum uzama değeri ise % 28 arttı.
2. Ti-15V-6Al alaşımı, Ti-15V-2Al ile karşılaştırıldığında akma dayanımında % 3 artış gösterirken, çekme dayanımı %16 ve kopma dayanımı %18 azaldı. Maksimum uzama değeri %11 arttı. Elastik modülü ise %13 azaldı.
3. Al içeriği arttıkça β fazın stabilitesi ve martensit dönüşümü etkilenmiş, bu durum mekanik dayanım ve uzama değerlerinde farklılıklar yaratmıştır.
4. Faz kararlılığı ve iç gerilmelerin dağılımı, mekanik performans üzerinde belirleyici olmuştur.
5. Yüksek Al içeriği (> %4), mekanik özelliklerde negatif etkilere neden olmuş, özellikle iç gerilim dağılımı ve tane sınırlarındaki faz dengesi mekanik dayanımı sınırlandırmıştır.

Sonuçlar, % 4 Al içeriğinin, optimum mekanik özellikler ve homojen bir mikroyapı sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, uygulama alanlarında optimum Al içeriği olarak % 4 önerilmektedir. Bu sonuçlar, Ti-15V-xAl (x:2,4 ve 6) alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır ve bu alaşımların uygulama alanlarına yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

5.KAYNAKLAR

- Altuğ, G. S., 2017 Nikel-titanyum alaşımlarının katmanlı imalat teknolojisi ile üretimi, karakterizasyonu ve özelliklerinin incelenmesi. (Doktora Tezi), İstanbul Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 50-64, İstanbul.
- Andreasen, G.F., 1977. Method and system for orthodontic moving of teeth. In: US Patents 4037324. A61G 7/00 ed. USA: University of Iowa Research Foundation; p. 8.
- Angilella, A.J., Gandhi, F.S. ve Miller, T.F., 2015. Design and testing of a shape memory alloy buoyancy engine for unmanned underwater vehicles. *Smart Mater. Struct.*, 24 (11), Article 115018.
- Banerjee, D. ve Williams, J. C., 2013. Perspectives on titanium science and technology. *Acta Materialia*, 61, pp 844-879.
- Bellin, I., Kelch, S., Langer, R. ve Lendlein, A., 2006. Polymeric triple-shape materials. *Proc Nat Acad Sci*, 103, pp. 18043-18047.
- Bhattacharya, K., 2003. Microstructure of martensite: Why it forms and how it gives rise to the shape-memory effect. Oxford University Press.
- Brugger, D., Kohl, M., Hollenbach, U., Kapp, A. ve Stiller, C., 2006. Ferromagnetic shape memory microscanner system for automotive applications. *Int J Appl Electromagnet Mech*, 23, pp. 107-112.
- Buehler, W. J., Gilfrich, J. ve Wiley, R., 1963. Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. *Journal of Applied Physics* 34, (5), pp 1475-1477.
- Caldwell, N., Gutmark, E. ve Ruggeri, R., 2007. Heat transfer model for blade twist actuator system. *J Thermophys Heat Transfer*, 21, pp. 352-360.
- Calkins, F.T. ve Mabe, J.H., 2010. Shape memory alloy based morphing aerostructures. *J Mech Des*, 132 , p. 111012.
- Catoor, D., Ma, Z. ve Kumar, S., 2019. Cyclic response of Nitinol under stress-stress loading and fatigue failure. *J. Mater. Res.* , 34 (20) , s. 3504 – 3522.
- Chee Siong, L., Yokoi. H.ve Arai T., 2005. New shape memory alloy actuator: design and application in the prosthetic hand. in: 27th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBS 2005). Shanghai, China; p. 6900–3.
- Chen, Y., Shen, X., Li, J. ve Chen, J., 2019. Nonlinear hysteresis identification and compensation based on the discrete Preisach model of an aircraft morphing wing device manipulated by an SMA actuator. *Chinese J. Aeronaut.*, 32 (4), pp. 1040-1050.

- Christian, J. W. ve Mahajan, S., 1995. Deformation twinning. Progress in Materials Science, 39, 1-157.
- Cleveland, M.A., 2008. Apparatus and method for releaseably joining elements. In: US Patent 7367738B2. The Boeing Co.
- Colorado, J., Barrientos, A., Rossi, C. ve Breuer, K.S., 2012. Biomechanics of smart wings in a bat robot: morphing wings using SMA actuators Bioinspiration Biomimetics, (7), p. 036006.
- Costa, C., Monteiro, M., Rangel, B. ve Alves, F.J.L., 2017. Industrial and natural waste transformed into raw material. Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. ppl., 231 (1-2) , pp. 247-256.
- Çevik, G. ve Gürbüz, R., 2013. Evaluation of fatigue performance of a fillet rolled diesel engine crankshaft. Engineering Failure Analysis. Volume 27, January Pages 250-261.
- Dang, M., Xiang, H., Li J. ve Qingsong, C.C., 2023. Laser powder bed fusion of full martensite Cu-Al-Mn-Ti alloy with good superelasticity and shape memory effect. Author links open overlay pa.
- DesRoches R., McCormick, J. ve Delémont, M., 2004. Cyclic properties of super elastic shape memory alloy wire and rods J. Yapı. Müh., 130 (1), s. 38 – 46. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.56-58.765.
- Dotter, C.T., Buschmann, R.W., McKinney, M,K ve Rösch, J, 1983. Transluminal expandable nitinol coil stent grafting: preliminary report. Radiology, 147, pp. 259-260.
- Dynalloy Inc Akıllı Malzeme Sistemleri ve Yapıları Dergisi 2007 Şekil hafızalı alaşımlı doğrusal aktüatörlerin tasarımı: Bir inceleme.
- Endoh, K., Tahara, M., Inamura, T., ve Hosoda, H., 2017. Effect of Sn and Zr content on superelastic properties of Ti-Mo-Sn-Zr biomedical alloys. J. Alaşımlar Compd. , 695, s. 76 – 82.
- Ergen S., 2018. Uçak Motorlarında Kullanılan Ti-Temelli Yeni Nesil Süper Alaşımın Sıcaklık ve Mekanik Zor Altında in-situ Çevrim Davranışlarının İncelenmesi (Proje No. 2018/21). Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi.
- Ergen S., 2022. The Effect of Al Content on Phase Transformation Temperatures and Microstructural Properties of Shape Memory Alloys. 6th International Conference on Advances in Natural & Applied Science Physics & Nanotechnology, ID-164-POP, 49-57, October 11-13, Ağrı, Türkiye.

- Favre, J., 2012. Recrystallization of L-605 Cobalt Superalloy in Hot Working Process. INSA , Lyon ; Tōhoku Daigaku (Sendai, Japon), 2012. English. (NNT: 2012ISAL0112). (tel-00876664) VERSION 1.
- Festo. BionicOpter – Inspired by dragonfly flight. Festo; 2013.
- Fu, G., Liu, X.W., Yi, X., Zhang, S., Cao, X., Meng, X., Gao, Z. ve Wang, H., 2023. Development of High-Entropy Shape-Memory Alloys: A Review. *Metals*. Journal Volume&issue Vol.13, no 7 p.1279.
- Fujun, P., Xin-Xiang, J., Yan-Ru, H. ve Ng, A., 2005. Application of shape memory alloy actuators in active shape control of inflatable space structures. Aerospace conference, IEEE, pp. 1-10.
- Gautam S.R., Jay V., Parth P. ve Rakesh C., 2022. Areas of recent developments for shape memory alloy: A review. Author links open overlay panel. Show more- 2022Volume 62, Part 13, 2022, Pages 7194-7198.
- GM. Chevrolet Debuts Lightweight ‘Smart Material’ on corvette. General Motors News; 2013.
- Groover, M. P, 2009. E1C03 P 40-53. 25.11.2009.
- Gupta, S., Pelton, A.R., Weaver, J.D., Gong, X.Y. ve Nagaraja, S., 2015. *Mater Des*, 12, pp. 29-32.
- Haga, Y., Esashi, M. ve Maeda S. Bending, 2000. Torsional and extending active catheter assembled using electroplating. In: MEMS 2000 the thirteenth annual international conference on 2000 Micro electro mechanical systems. p. 181–6.
- He, Y.H., Zhang, Y. Q., Jiang, Y.H. ve Zhou, R., 2017. Fabrication and characterization of superelastic Ti-Nb alloy enhanced with antimicrobial Cu viaspark plasmas intering for biomedical applications, *J. Mater. Res.* 32 .sf 2510–2520.
- Hodgson, D.E., Wu, M.H. ve Biermann R.J., 1990. Shape memory alloys. *ASM Handbook: ASM International*, pp. 897-902.
- Humbeeck, J.V., Chandrasekaran, M. ve Delaey, L., 1991. Shape memory alloys: materials in action. *Endeavour*, (15), pp. 148-154.
- Icardi, U. ve Ferrero, L., 2009. Preliminary study of an adaptive wing with shape memory alloy torsion actuators. *Mater Des*, 30, pp. 4200-4210.
- J.N. Kudva, J.N., 2004. Overview of the DARPA smart wing Project *J Intell Mater Syst Struct*, 15, pp. 261-267.
- Jani, J.M., Leary, M., Subic, A. Ve Gibson, M.A., 2014. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Mater. Des.*, 56, pp. 1078-1113.

- Johnson, A.D., 1992. Non-explosive separation device. In: US Patents 5119555.
- Kahny, H., Huffz, M.A. ve Heuer, A.H., 1998. The TiNi shape-memory alloy and its applications for MEMS. *Micromech Microeng*, 8, pp. 213-221.
- Kalay, E., 2019. Ni-Ti Bazlı Şekil Hafızalı Alaşımlarda Termal Yaşlandırma ve Şekil Hafıza Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Kauffman, G. Ve Mayo, I., 1997. The story of Nitinol: the serendipitous discovery of the memory metal and its applications *Chem Educator*, 2, pp. 1-21.
- Kim, H. Y. ve Hosoda, H. (2004). Ti-Nb-based shape memory alloys with high strength and high ductility. *Acta Materialia*.
- Kim, S., Hawkes, E., Choy, K., Joldaz, M., Foley, J. ve Wood, R., 2009. Micro artificial muscle fiber using niti spring for soft robotics. *IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, IEEE, St. Louis, MO, USA (2009), pp. 2228-2234.
- Krumme, J.F. ve Dickinson, F.C., 2001. Golf club head or face. In: US Patents 6277033B1. Pixl Golf Technologies Inc., Palo Alto, CA, USA; 2001.
- KSÜ, 2017. Çekme Deneyi. 1703091413100185.pdf. https://mm.ksu.edu.tr/depo/belgeler/ksu_cekme_deneyi_1702_221612397020.pdf. Kahramanmaraş.
- Kurgun, M.A., 2019. CuAlMnFe Şekil Hafızalı Alaşımlarda Yaşlanmanın Karakteristik Dönüşüm Sıcaklıkları ve Kinetik Parametreler Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin Üniversitesi, Mersin.
- Lee, H. ve Kim, J., 2018. Phase transformation and mechanical behavior in Ti-V-Al alloys with varying aluminum content. *Materials Science and Engineering A*, 738, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.019>.
- Li, D., Zhao, S., Da, A., Ronch, Xiang, J., Drofelnik, J., Li, Y., Zhang, L., Wu, Y., Kintscher, M. ve Monner, H.P., 2018. Dönüşen kanatların modellenmesi ve analizine ilişkin bir inceleme. *Prog. Aero. Bilim*, 100, s. 46 – 62.
- Lim, G., Park, K., Sugihara, M., Minami, K. ve Esashi, M., 1996. Future of active catheters. *Sens Actuators, A*, (56), pp. 113-121.
- Liu, Y., 2010. Some factors affecting the transformation hysteresis in shape memory alloys. H.R. Chen (Ed.), *Shape memory alloys: manufacture, properties and applications*, Nova Science Publishers, pp. 361-369.

- Long, M., 2013 (Ed.). World congress on medical physics and biomedical Engineering May 26–31, 2012, Springer Berlin Heidelberg, Beijing, China, pp. 119-121.
- Machado, L.G. ve Savi, M.A., 2003. Medical applications of shape memory alloys. *Braz J Med Biol Res*, (36), pp. 683-691.
- Maehara, K. ve Chikaraishi, T., 1999. Golf ball. In: US Patents 5913736A. Bridgestone Sports Co. Ltd., Tokyo, Japan; 1999.
- Mane, A., Desai, N., Jagtap, N., Jadhav, V. ve Nagawade, T., 2019. Review on shape memory alloy on biomedical applications. *Glob. J. Eng. Sci. Res.*, 6 (January), pp. 229-239, 10.5281/zenodo.2553640.
- Mantovani, D., 2000. Shape memory alloys: properties and biomedical applications. *JOM*, (52), pp. 36-44.
- Melton K.N., 1999. General applications of shape memory alloys and smart materials. Otsuka, K., Wayman, C.M. (Eds.), 1999 Shape memory materials, Cambridge University Press , pp. 220-239.
- Mieloszyk, M., Krawczuk, M., Zak, A. ve Ostachowicz, W., 2010. An adaptive wing for a small-aircraft application with a configuration of fibre Bragg grating sensors. *Smart Mater Struct*, 19, p. 085009.
- Mihálcz, I., 2001. Fundamental characteristics and design method for nickel-titanium shape memory alloy *Periodica Polytechnica Ser Mech Eng*, 45, pp. 75-86.
- Mirzaeifar, R., DesRoches, R., Yavari, A. ve Gall K., 2012. Coupled thermo-mechanical analysis of shape memory alloy circular bars in pure torsion. *Int J Non-Linear Mech*, 47, pp. 118-128.
- Miyazaki, S., Kohiyama, Y., Otsuka, K. ve Duerig, T., 1990. Effects of various factors on the ductility of Ti-Ni alloy. *Material science forum* January 56-58:765-770.
- Mohamed Ali, M.S. ve Takahata, K., 2010. Frequency-controlled wireless shape-memory-alloy microactuators integrated using an electroplating bonding process *Sens Actuators, A*, (163), pp. 363-372.
- Morgan, N.B., 2004. Medical shape memory alloy applications – the market and its products. *Mater Sci Eng, A*, 378, pp. 16-23.
- Mosca, H.O., Bozzolo, G. ve Grosso, M.F.D., 2012. Fizik. B Yoğunlaşır. Madde , 407 , s. 3244 – 3247.
- Noebe, R.D., Draper, S.L., Nathal, M.V. ve Garg, A., 2009. High work output Ni–Ti–Pt high temperature shape memory alloys and associated processing methods. In: US Patents 7501032B1. The United states of America, NASA Washington DC, USA.

- Oehler, S.D., Hartl, D.J., Lopez, R., Malak, R.J. ve Lagoudas, D.C., 2012. Design optimization and uncertainty analysis of SMA morphing structures. *Smart Mater Struct*, 21, p. 094016.
- Otsuka, K. ve Ren, X., 2005. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*, 50, 511-678.
- Ölander, A., 1932. An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys. *Journal of the American Chemical Society*, 54, (10), 3819-3833.
- Pelton, A.R., Schroeder, V., Mitchell, M.R., Gong, X.Y., Barney, M. ve Robertson, S.W., 2008. Fatigue and durability of Nitinol stents. *J Mech Behav Biomed Mater*, (1), pp. 153-164.
- Petrini, L. ve Migliavacca, F., 2011. Biomedical applications of shape memory alloys. *J Metall* 2011; XIV, Springer, Berlin Heidelberg, pp. 206-217.
- Pfeifer, R., Müller, C.W., Hurschler, C., Kaierle, S., Wesling, V. ve Haferkamp, H., 2013. Adaptable orthopedic shape memory implants. *Procedia CIRP*, (5), pp. 253-258.
- Pitt, D., Dunne, J., White, E., Garcia, E., 2001. SAMPSON smart inlet SMA powered adaptive lip design and static test. In: 42nd AIAA structures, structural dynamics, and materials conference. Seattle, WA, USA; p. 1–11.
- Riccio, A., Sellitto, A., Ameduri, S., Concilio, A. ve Arena, M., 2021. Otomotiv Uygulamaları ve Zorluklar için Şekil Hafızalı Alaşımlar (SMA) . *Shape Memory Alloy Engineering*, Elsevier , pp. 785-808, 10.1016/B978-0-12-819264-1.00024-8.
- Ruiz-del-Solar, J., Chown, E. ve Plöger P., 2011. (Eds.), *RoboCup 2010: Robot Soccer World Cup XIV*, Springer, Berlin Heidelberg , pp. 206-217.
- Sevcikova, J. ve Pavkova Goldbergova M., 2017. Biocompatibility of NiTi alloys in cell behavior. *Biometals* , 30 (2) , s. 163 – 169.
- Shahverdi, M., Czaderski, C. ve Motavalli, M., 2016. Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams. *Constr. Build. Mater.*, (112), pp. 28-38.
- Shiraishi, Y., Yambe, T., Saijo, Y., Sato, F., Tanaka, A., Yoshizawa, M., Ogawa, D., Wada, Y., Itoh, S., Sakata, R., Park, Y., Uematsu, M., Umezu, M., Fujimoto, T., Masumoto, N., Liu, H., Baba, A., Konno, S., Nitta, S., Imachi, K., Tabayashi, K., Sasada, H., Homma, D., 2007. Morphological approach for the functional improvement of an artificial myocardial assist device using shape memory alloy fibres. In: 29th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society, (EMBS 2007); p. 3974–7.

- Smith, J., Wang, Y., ve Taylor, R., 2020. Microstructural evolution and mechanical properties of TiVAl-based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 845, 155734. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155734>.
- Sofla, A.Y.N., Meguid, S.A., Tan, K.T. ve Yeo, W.K., 2010. Shape morphing of aircraft wing: status and challenges. *Mater Des*, 31, pp. 1284-1292.
- Song, C., 2010. History and current situation of shape memory alloys devices for minimally invasive surgery. *Open Med Dev J*, (2), pp. 24-31.
- Song, G., Patil, D., Kocurek, C. ve Bartos, J., 2010. Applications of shape memory alloys in offshore oil and gas industry: a review. In: *Proc earth and space 2010—engineering, science, construction, and operations in challenging environments* (Honolulu, HI, USA, 14–17 March 2010); p. 366.
- Song, G., Ma, N. ve Li, H.N., 2006. Applications of shape memory alloys in civil structures. *Eng Struct*, 28, pp. 1266-1274.
- Sreekumar M., Nagarajan T., Singaperumal M., Zoppi M. ve Molfino, R., 2009. Critical review of current trends in shape memory alloy actuators for intelligent robots. *Ind Rob.: Int J*, 34, pp. 285-294.
- Stephen, J.F., George, B. ve Stefan, S., 2013. Design and fabrication of a bat-inspired flapping-flight platform using shape memory alloy muscles and joints. *Smart Mater Struct*, (22), p. 014011.
- Stirling, L., Yu, C.H., Miller, J., Hawkes, E., Wood, R., Goldfield, E. Ve Nagpal, R., 2011. Applicability of shape memory alloy wire for an active, soft orthotic. *J Mater Eng Perform*, (20), pp. 658-662.
- Stoeckel, D., 1995. Shape memory effect: Phenomenon, alloys, application. Schetky LM (ed.) *Papers: Shape Memory Alloys for Power Systems*, s. 1–13. California: EPRI ve Memry.
- Sun, L., Huang, W.M., Ding, Z., Zhao, Y., Wang, C.C. ve Purnawali, H. ve Tang, C., 2012. Stimulus-responsive shape memory materials: a review. *Mater Des*, 33, pp. 577-640.
- Tao, T., Liang, Y.C. ve Taya, M., 2006. Bio-inspired actuating system for swimming using shape memory alloy composites. *Int J Automat Comput*, 3, pp. 366-373.
- Terzo, G., 2006. Taking the pulse of the stent market. in: *Investment dealers' digest* p. 12.
- Testa, C., Leone, S., Ameduri, S. ve Concilio, A., 2005. Feasibility study on rotorcraft blade morphing in hovering. :171–82.

- Tung, A.T., Park, B.H., Liang, D.H. ve Niemeyer, G., 2008. Laser-machined shape memory alloy sensors for position feedback in active catheters. *Sens Actuators, A*, (147), pp. 83-92.
- Vernon, L.B. ve Vernon, H.M., 1941. Process of manufacturing articles of thermoplastic synthetic resins. In: US Patent 2234993.
- Wang, J., Zhang, Q. ve Li, H., 2020. Martensitic transformation in Ti-V alloys with varying aluminum additions. *Journal of Alloys and Compounds*, 805, 1193-1202.
- Williams, E.A., Shaw, G. ve Elahinia, M., 2010. Control of an automotive shape memory alloy mirror actuator. *Mechatronics*, 20 (5), pp. 527-534.
- Yamada, A., Shiraishi, Y., Sugai, T.K., Miura, H., Shiga, T., Hashem, M.O., Koga C., Hashimoto, H., Tsuboko, Y., Yambe, T., Yamagishi, M. ve Homma, D., 2012. Preliminary design of the mechanical circulation assist device for fontan circulation using shape memory alloy fibers. *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering May 26-31, 2012, Beijing, China*.
- Yang, Z.Y., Zheng, X.H. ve Cai, W., 2015. Martensitic transformation and shape memory effect of Ti-V-Al lightweight hightemperature shape memory alloys. *Scripta Materialia* 99, 97-100.
- Yang, Z.Y., Zheng, X.H., Wu, Y. ve Cai, W., 2016. Martensitic transformation and shape memory behavior of Ti-V-AlFe lightweight shape memory alloys. *Journal of Alloys and Compound*, 680, 462-466.
- Yang, Z.Y., Zheng, X.H., Wu, Y., Li, S.E., Li, K., Gao, F., Zhang, H. ve Hedrick, J.K., 2016. Dynamical Modeling and Distributed Control of Connected and Automated Vehicles: Challenges and Opportunities *J. Alaşımlar Compd.* 680, s. 462 – 466.
- Yeon-wook Kim, 2023. Specific mechanical properties of highly porous Ti-Zr-Mo-Sn shape memory alloy for biomedical applications Author links open overlay panel.
- Yıldız Teknik Üniversitesi, 2023. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü MEM3961 Laboratuvar I Deney Föyü 2023-2024 GÜZ. <https://labsis.yildiz.edu.tr>. İstanbul.
- Yi, X.Y., Meng, X.L., Cai, W. ve Zhao, L., 2018. Larger strain recovery characteristics of Ti-Ni-Hf shape memory alloy composite under compression. *Scripta Mater.* 153, s. 90 – 93.
- Yi, X.Y., Gao, W.H. ve Wang, H.Z., Sun, B., Sun, K. Liu, J., Meng, X., Cai, W., ve Zhao, L., 2019. The crystallization process, microstructure, martensitic

- transformation and mechanical properties of Ti-Ni-Zr alloy ribbons. *Journal of Alloys and Compounds*, 778, s. 542 – 553.
- Yi, X.Y., Gao, W.H., Sun, B. , ve diğerleri, 2019. *Başvuru Sörf. Bilim.* 481, s. 262 – 271.
- Yu, L., Chen, K., Zhang, Y., Liu, J., Yang, L. ve Shi, Y., 2022. Microstructures and mechanical properties of NiTi shape memory alloys produced by wire arc additive manufacturing. *J. Alışimler Compd.*, 892, Madde 162193.
- Zareie, S., Issa, A.S., Seethaler, R.J. ve Zabihollah, A., 2020. Recent advances in the applications of shape memory alloys in civil infrastructures: a review. *Structures*, 27 (May) (2020), pp. 1535-1550.
- Zhan, J., Wu, J., Ma, R., Li, K., Huang, T., Lin, J. ve Murr, L.E., 2023. Effect of microstructure on superelasticity of high relative density Ni-rich NiTi alloys produced by laser powder bed fusion .*Journal of Materials Processing Technology* Volume 317, 117988.
- Zhang, X., ve Li, Z., 2019. Phase stability and mechanical performance of Ti-V-Al alloys under varying aluminum concentrations. *Intermetallics*, 112, 106495.
- Zhang, Y. ve Xu, X., 2020. Transformation temperature predictions using computational intelligence for NiTi-based shape memory alloys *Shape Memory and Superelasticity*, 2020, Springer.
- Zhou, W., Liu, X. ve Wang, L., 2018. Influence of aluminum content on the mechanical properties of Ti-V-Al alloys. *Materials Science and Engineering A*, 735, 223-230.