T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UÇAK UYGULAMALARI İÇİN ŞEKİL BELLEKLİ MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Aslıhan ÜZÜMCÜ

DANIŞMAN
Prof. Dr. İlven MUTLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2021

Bu çalışma, 25.08.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof.Dr. İlven MUTLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Doç.Dr. Aliye ARABACI
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr.Öğr. Üyesi Oğuzhan DEMİR
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 35176 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Öncelikle tez çalışmamın planlanmasında ve çalışmanın hazırlanma sürecinin her aşamasında bilgisini, tecrübesini ve değerli zamanını esirgemeyerek her fırsatta çalışmamla yakından ilgilenen sayın danışman hocam Prof. Dr. İlven Mutlu'ya sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını, engin bilgi ve tecrübelerini eksik etmeyen İstanbul Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümündeki tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bu süreçte her zaman yanımda olan benden desteğini esirgemeyen Sadık Sefa Aslan'a, Bureau Veritas Gözetim Hiz. Ltd. Şti.'deki yöneticilerim ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili anneme, babama ve biricik kardeşim Neslihan Üzümcü'ye teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ağustos 2021 Aslıhan ÜZÜMCÜ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vi**
TABLO LİSTESİ ..... **vi**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **ix**
ÖZET ..... **x**
SUMMARY ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **2**
2.1. UÇAK YAPISI……..……..……2
2.2. UÇAK MALZEMELERİ…….……..…….....7
2.3. ŞEKİL BELLEKLİ MALZEMELER……..…..…10
2.4. LITERATÜR ÇALIŞMASI……..23
3. MALZEME VE YÖNTEM.....**……25**
3.1. NUMUNE ÜRETİMİ……..…….……25
3.2. KARAKTERİZASYON…….…..30
4. BULGULAR **32**
4.1. MİKROYAPI…….…..32
4.2. MEKANİK ÖZELLİKLER…….35
4.3. ELEKTROKİMYASAL KOROZYON ÖZELLİKLERİ……40
5. TARTIŞMA VE SONUÇ **43**
KAYNAKLAR **46**
ÖZGEÇMİŞ **48**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şeki1.2.1: Tipik bir uçak yapısı **…….3.**

Şeki1.2.2: Sivil yolcu uçağı yapısı **……...….3.**

Şeki1.2.3: Tipik bir kanat ve kuyruk (empennage) yapısı **…….……..…..…….4.**

Şeki1.2.4: Tipik bir uçak üzerindeki kuvvetler **…….5.**

Şeki1.2.5: Turbo-jet motor **……...…….6.**

Şeki1.2.6: Uçaklarda kullanılan malzemelerin dağılımı **……..…….7.**

Şeki1.2.7: Uçaklarda kullanılan malzemeler **……..……..….8.**

Şeki1.2.8: Boeing uçaklarında kompozit malzemeler **……...……..…….8.**

Şeki1.2.9: Turbo-jet motorda kullanılan malzemeler **……..…….…….9.**

Şeki1.2.10: Şekil bellekli alaşımlarda fazlar ve kristal yapı **…….11.**

Şeki1.2.11: a) Tek yönlü şekil bellek etkisi ve b) Superelastik davranış **……..……12.**

Şeki1.2.12: a) Tek yönlü ve b) çift yönlü şekil bellek davranışı ……....**13.**

Şeki1.2.13: a) Martenzitik faz dönüşümü ve b) süperelastik bölge **……..…....14.**

Şeki1.2.14: Martenzitik dönüşüm öncesi (sol) ve sonrası (sağ) kristal yapı……..**16.**

Şeki1.2.15: Ti-Ni Faz Diyagramı**…….…..….16.**

Şeki1.2.16: Polimerlerde şekil bellek davranışı**…….……17.**

Şeki1.2.17: Şekil bellekli polimerler**…….18.**

Şeki1.2.18: Şekil değiştirebilen kanat**……..….19.**

Şeki1.2.19: Şekil değiştirebilen kanat mekanizması**…….….19.**

Şeki1.2.20: Gürültü azaltıcı şekil bellekli hareketli şerit (chevron)**……..….20.**

Şeki1.2.21: Motor giriş kulakçıkları**……..…21.**

Şeki1.2.22: şekil değiştirebilen kanat**……..…22.**

Şeki1.3.1: a) Bilyeli değirmen ve b) hidrolik pres **…….….25.**

Şeki1.3.2: Sinterleme fırını **……..……..….26.**

Şeki1.3.3: Şekil bellek eğitimi **…….27.**

Şeki1.3.4: Replika yöntemi **……..……..…….28.**

Şeki1.3.5: Basma cihazı……**…….….30.**

Şeki1.3.6: Ultrasonik test cihazı……**…….…….….31.**

Şeki1.4.1: Temel hammaddelerin SEM fotoğrafları a) Ni tozu, b) Ti tozu **…….32.**

Şeki1.4.2: Alaşım elementlerinin SEM fotoğrafları of a) Co tozu, b) Sn tozu, c) Si tozu **…...33.**

Şeki1.4.3: Sinterlenmiş Ti-Ni-Co alaşımının SEM fotoğrafı **……..…….34.**

Şeki1.4.4: Numunelerde elastisite modülünün sıcaklık ile değişimi **……37.**

Şeki1.4.5: Yaşlandırma sıcaklığının elastisite modülüne etkisi **……..38.**

Şeki1.4.6: Alaşımların dönüşüm sıcaklığı değerleri **……...39.**

Şeki1.4.7: Alaşımlarının a) korozyon hızı ve b) polarizasyon direnci sonuçları **……40.**

Şeki1.4.8: XRD sonuçları a) Ti, b) Ni, c) Ti-Ni **……..….41.**

Şeki1.4.9: Ti-Ni katkılı epoksi matrisli kompozit malzemeler **……..……42.**

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: NiTi malzemenin özellikleri ……..…...**15**

Tablo 3.1: Ti-Ni alaşımlarının kimyasal bileşimi …….……..……....**25**

Tablo 4.1: Malzemelerin ultrasonik hız değerleri ve hesaplanan elastisite modülü değerleri...**35**

Tablo 4.2: Alaşımların sinterleme işlemi öncesi ve sonrası yoğunluk değerleri ……. ...**36**

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
T	**:** Sıcaklık
t	**:** Zaman
º	**:** Derece

Kısaltmalar	Açıklama
Al	**:** Alüminyum
mg	**:** Mili gram
mm	**:** Mili metre
nm	**:** Nano metre
ppm	**:** Milyonda bir
PVA	**:** Polivinilalkol
µm	**:** Mikro metre
Co	**:** Kobalt
Ni	**:** Nikel
Ti	**:** Titanyum

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UÇAK UYGULAMALARI İÇİN ŞEKİL BELLEKLİ MALZEMELERİN ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Aslıhan ÜZÜMCÜ

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. İlven MUTLU

Bu tez çalışmasında, uçak uygulamaları için şekil bellekli malzemelerin üretilmesi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Şekil bellekli malzemeler, deformasyona uğratıldıktan sonra, sıcaklık veya gerilmelere bağlı olarak önceki şeklini hatırlayan ve geri dönebilen malzemelerdir. Metal alaşımları geleneksel toz metalurjisi (pres-sinter) yöntemi ile üretilmiştir. Alaşım tozları mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) ile hazırlanmıştır. Ardından, presleme (toz metalurjisi) ile ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra numuneler vakum ortamında 1200 °C sıcaklıkta 1 saat sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numunelere şekil bellek eğitimi ısıl işlemleri uygulanmıştır. Ayrıca titanyum içerisine ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin çeşitli özelliklere etkileri incelenmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri tahribatlı (basma) ve tahribatsız (ultrasonik test), ile incelenmiştir. Ayrıca ürünlerin elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde incelenmiştir.

Ağustos 2021, 59. sayfa.

Anahtar kelimeler: Uçak malzemesi, Ni-Ti, Şekil bellek, Toz metalurjisi, elastisite modülü

SUMMARY

M.Sc. THESIS

PRODUCTION AND CHARACTERISATION OF SHAPE MEMORY MATERIALS FOR AIRCRAFT APPLICATIONS

Aslıhan ÜZÜMCÜ

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor : Prof. Dr. İlven MUTLU

In this study, shape memory alloys for aircraft applications were produced and investigated. Metal alloys were produced by treaditional powder metallurgy (press sinter) method. Alloy powders were prepared by ball mill (mechanical alloying). Then, green specimens were produced by compaction of the metal alloy powders. Then, the green specimens were sintered at 1200 °C for 1 hour in vacuum environment. Then, shape memory training (heat treatment) was carried out in order to enhance the shape memory behaviour. In addition, effects of alloying elements on the properties were investigated. Microstructure and mechanical properties of the specimens were investigated by destructive compression tests and nondestructive ultrasonic tests. In additioni electrochemical corrosion behaviour of the specimens were studied in NaCl solution.

August 2021, 59. pages

Keywords: Aircraft material, Ni-Ti, Shape memory, Powder metallurgy, Elastic modulus

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, uçak uygulamaları için şekil bellekli Ni-Ti alaşımı esaslı malzemelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretilmesi ve mikroyapı/mekanik özelliklerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Genel olarak şekil bellekli malzemeler, belirli bir plastik deformasyona (şekil değişikliği) uğratıldıktan sonra, uygulanan sıcaklık veya gerilmelere bağlı olarak deformasyon öncesi ilk şeklini hatırlayan ve deformasyon öncesi ilk şekline geri dönebilen mühendislik malzemeleridir. Tez kapsamında, şekil bellekli Ni-Ti esaslı metal alaşımları geleneksel toz metalurjisi (pres-sinter) yöntemi ile üretilmiştir. İlk olarak, Ni-Ti alaşım tozları belirlenen oranlarda tartılmış ve mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) yöntemi ile hazırlanmıştır. Ardından, alaşım toz karışımları tek eksenli preslenerek (toz metalurjisi) ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra ham numuneler vakum ortamında 1200 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numunelere şekil bellek eğitimi ısıl işlemleri uygulanmıştır. Ayrıca Ti-Ni alaşımı içerisine ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin çeşitli özelliklere etkileri incelenmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri tahribatlı (basma) ve tahribatsız (ultrasonik muayene) testlerile incelenmiştir. Tahribatlı ve tahribatsız test sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca üretilen alaşımların elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde incelenmiştir.

Genel olaraki Ni ve Ti metallerinin erime sıcaklıkları nispeten oldukça yüksektir. Ayrıca özellikle titanyum çok aktif bir metaldir ve bu nedenle özellikle döküm yöntemi ile üretimi de çok zordur. Genel olarak Ti ve Ni elementleri kullanılarak Ti-Ni esaslı alaşımların döküm yöntemi ile üretimi oldukça zor ve aynı zamanda enerji sarfiyatından dolayı ekonomik değildir. Bu nedenle genel olarak Ni-Ti esaslı şekil bellekli alaşımların toz metalurjisi yöntemi ile üretilmesi çok daha avantajlıdır. Ayrıca toz metalurjisi-mekanik alaşımlama yöntemi ile döküm yöntemi ile mümkün olmayan oranlarda alaşım elementlerinin (özellikle refrakter metaller) faz/denge diyagramlarına bağlı kalınmadan alaşım yapısına ilave edilmesi mümkün olmaktadır.

Genel olarak şekil bellekli (şekil hafızalı) malzemeler yeni bir mühendislik malzeme türüdür. Şekil hafızalı malzemeler öncelikle östenit faz bölgesinden aniden soğutularak martenzit faz yapısına dönüştürülmekte, daha sonra martenzit faz yapısında deformasyona uğratılmakta (ikinci şekil), daha sonra tekrar ısıtılarak östenit faza dönüşmek suretiyle ilk şekillerine geri dönebilen malzemelerdir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. UÇAK YAPISI

Uçak; hava akımının başta kanatlar olmak üzere kanat profilli parçaların alt ve üst yüzeyleri arasında basınç farkı oluşturması sayesinde havada tutunarak yükselebilen, ilerleyebilen motorlu bir hava taşıtıdır/aracıdır. Genel olarak havada yüksek hızlarda hareket edebilen motorlu hava araçları (yolcu uçakları, kargo uçakları veya muharip uçaklar) olarak tanımlanabilen uçaklar, bazı istisnalar dışında havada tutunmayı sağlayan kanatlar, kanatları dengeleyen kuyruk, uçağın pozisyonunu değiştiren kumanda yüzeyleri, itmeyi sağlayan motor, yolcu/yükleri barındıran gövde gibi 5 genel kısımdan meydana gelmektedir [1-9];

Ana Gövde

- Yatay Ana Elemanlar (Stringer)
- Dairesel Ana Elemanlar (Frame)
- Basınç Duvarları (Bulkhead)
- Gövde Yüzeyi (Skin)
- Döşeme Yapıları

Havada Tutunmayı Sağlayan Kanat

- Aileron (kontrol yüzeyi)
- Flap (kontrol yüzeyi, kavis, kaldırma kuvveti)
- Spar

Denge Sağlayan Kuyruk (Empennage)

Zemine Tutuş Sağlayan İniş Takımları

Uçağın Pozisyonunu Ayarlayan Birincil Uçuş Kumanda Yüzeyleri

- Kanatçık (aileron, yatış)
- İstikamet dümeni (rudder, burun sol-sağ kuyruktaki dik kısım)
- İrtifa dümeni (elevator, burun yukarı-aşağı)

Uçağın Pozisyonunu Ayarlayan İkincil Uçuş Kumanda Yüzeyleri

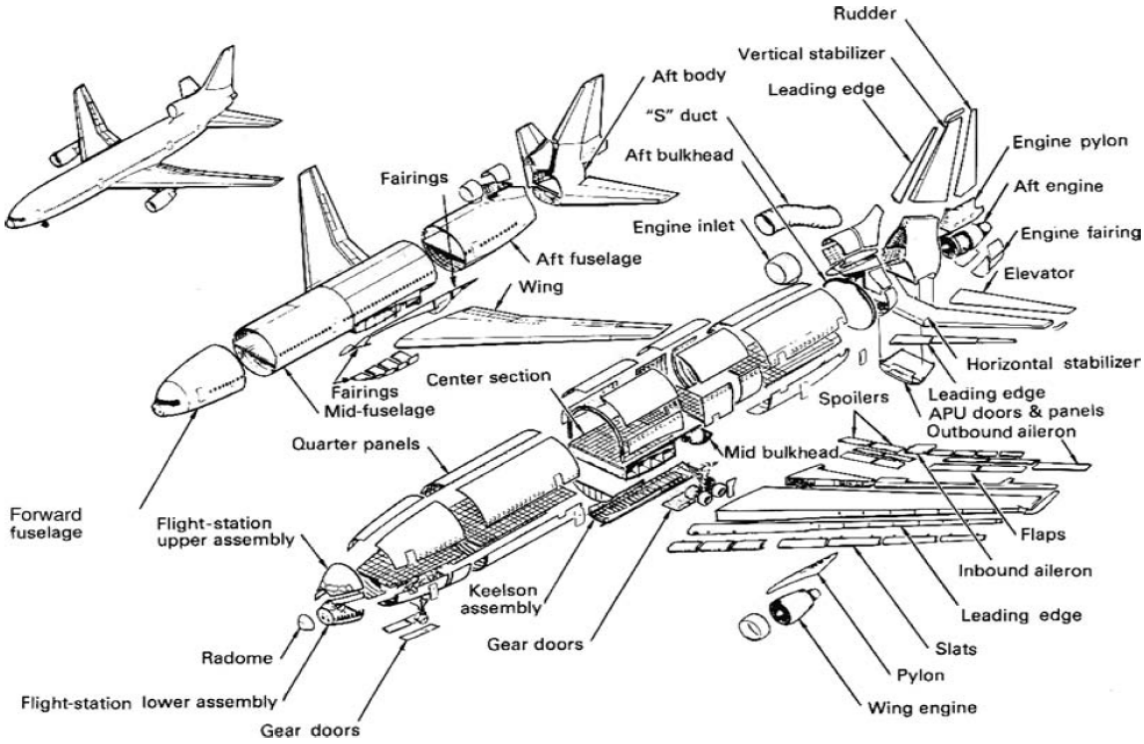
- spoilerlar
- flaplar
- slatlar

Aşağıdaki Şekil 2.1'de genel olarak tipik bir uçağın şematik olarak yapısı görülmektedir. Tipik bir uçakta bulunan temel kısımlar görülmektedir.



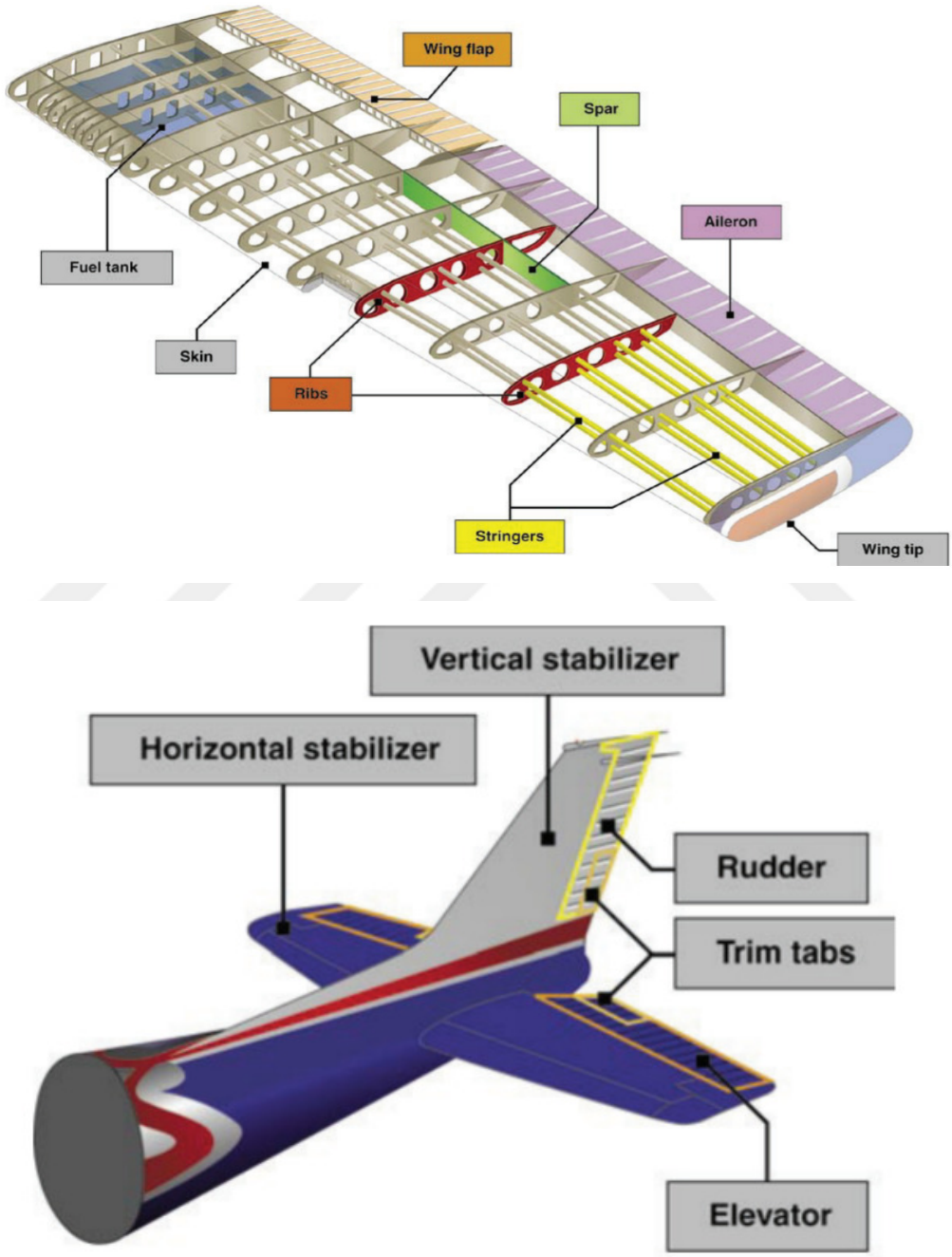
Şekil 2.1: Tipik bir uçak yapısı [1]

Aşağıdaki Şekil 2.2'de tipik bir sivil yolcu uçağının şematik olarak çizilmiş yapısı (Lockheed diyagramı) görülmektedir. Günümüzde genellikle yolcu uçaklarının gövdeleri yarı-monokok, muharip uçaklar ise monokok tasarıma sahiptir.



Şekil 2.2: Sivil yolcu uçağı yapısı [3]

Aşağıdaki Şekil 2.3'de tipik bir uçağın kanadının ve kuyruğunun önemli kısımları kısımları şematik olarak görülmektedir. Genel olarak bir uçak yapısında uçağı havada tutmaya yarayan en önemli kısım kanat kısmıdır. Kanatlar aynı zamanda yakıt deposu görevi de görebilmektedir. Uçak yapısının en arka kısmında bulunan kuyruk kısmının temel görevi uçuş esnasında uçağa stabilite sağlamasıdır.



Şekil 2.3: Tipik bir kanat ve kuyruk (empennage) yapısı [5]

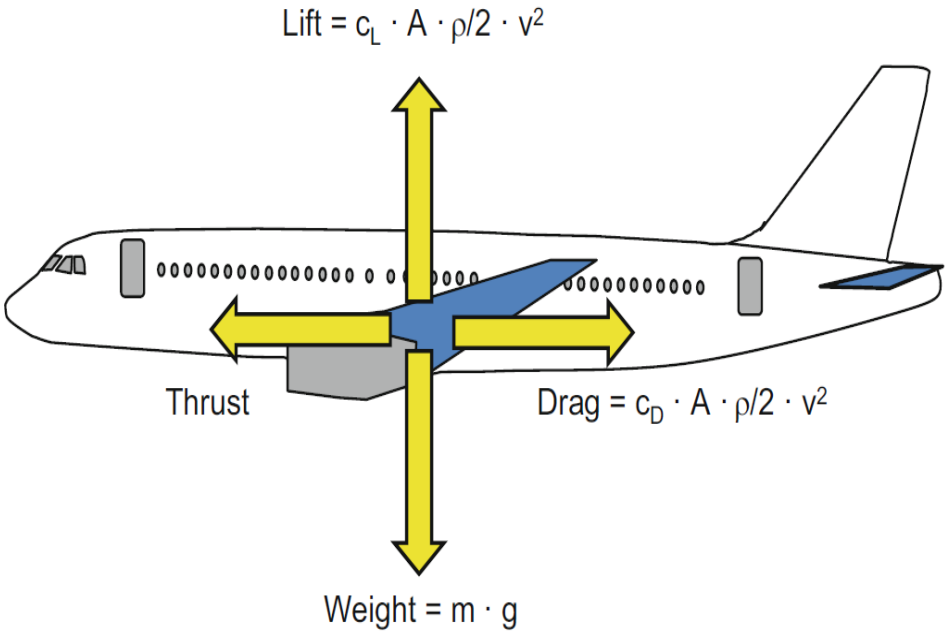
Aşağıdaki Şekil 2.4'de tipik bir uçakğa etki eden kuvvetler şematik olarak görülmektedir. Uçağın havada kalabilmesi (sabit hızlı hareket) için etki eden kuvvetlerin net bileşkesi sıfır olmalıdır.

Genelolarak havanın kaldırma kuvvetinin ağırlığa eşitolması gerekmektedir. Aynı şekilde uçuş için motor itki kuvvetinin uçak hareketine zıt yönde olan hava sürüklenme kuvvetinden büyük olmalıdır. Uçağa etki eden kuvvetler (lift, thrust, dragş weight) uçağın ağırlık merkezinde (centroid) kesişmektedirler.

Genel olarak bir uçak kanadının taşıma kuvveti, uçak kanadının uçuş doğrultularına dik olan doğrultu boyunca ve kanadın sırtı yönünde pozitif olacak şekilde tanımlanmaktadır.

Uçağa etki eden kuvvetler:

- Lift - Havanın kaldırma kuvveti
- Weight - Yerçekimi kuvveti (uçağın ağırlığı)
- Drag - Hava sürtünme kuvveti (sürüklenme kuvveti)
- Thrust - Motor (itki) kuvveti

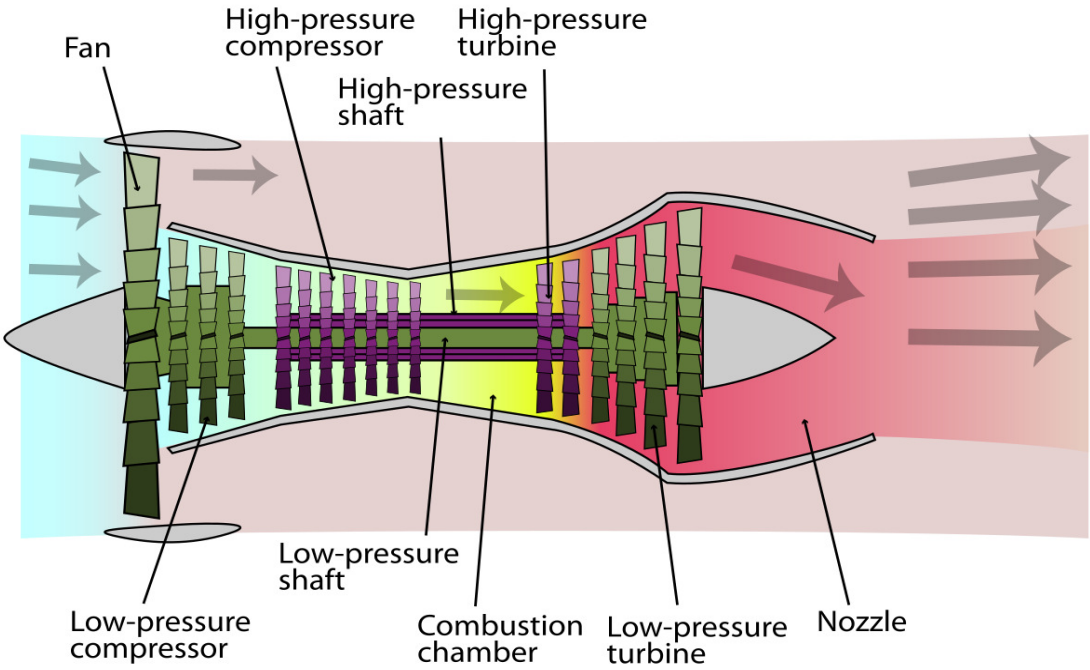


Şekil 2.4: Tipik bir uçak üzerindeki kuvvetler [1]

Uçak Motor Kısmı

Uçaklarda motorun temel görevi hava aracına itiş gücü sağlamaktır. Uçak için gerekli itki, motor tarafından meydana getirilen çok yüksek hızdaki akışkan jeti ile sağlanır. Motor mekanik enerji üretmektedir. Bu amaçla genellikle hava solumalı tepkili turbojet motorlar kullanılmaktadır. Bu tip motorlar aldığı havayı sıkıştırmakta ve yakıt ile yakarak meydana gelen egzoz gazları sonucu ters yönde bir tepki üretmektedir. Ayrıca içten yanmalı tip şaftlı gaz türbinli (turbo) motorlar (pervaneli motor) veya daha seyrek olarak içten yanmalı şaftlı pistonlu motorlar kullanılır.

Motorlarda farklı şartlarda bulunan giriş, sıkıştırma, yanma ve egzoz bölümleri bulunmaktadır (Hava-girişi (havaalığı), kompresör, yanma odası, türbin, nözül). Havaalığı havaın motora girdiği kısımdır. Türbin tarafından döndürülen kompresör motora giren havayı şıkıştırıp basıncını arttırmakla görevlidir. Yanma odasında yakıt ile yanan hava ısınmakta ve türbini döndürmektedir. Türbin motorun şaftına bağlıdır. Sıcak havanın döndürdüğü türbin aynı zamanda motor şaftını da döndürür. Nozülün görevi ise çıkan egzoz gazını genişleterek atmosfere vermektir.



Şekil 2.5: Turbo-jet motor [8]

2.2. UÇAK MALZEMELERİ

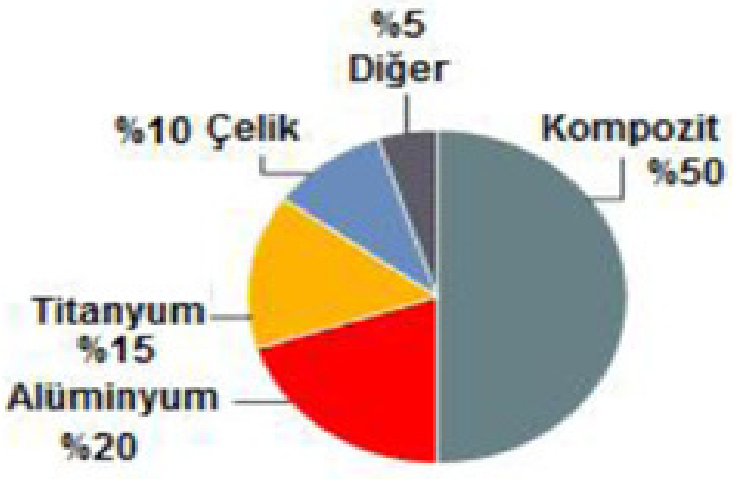
Genel olarak uçak üretiminde kullanılan temel mühendislik malzemelerin seçiminde aşağıdaki temel faktörler dikkate alınmaktadır [1-9];

- Tokluk (malzemenin enerji absorblama/darbeye dayanım kabiliyeti yüksek olmalıdır)
- Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı (malzeme hafif ve mukavemetli olmalıdır)
- Düşük çatlak ilerleme hızı (malzeme çatlak ilerlemesine ve kırılmalara karşı dayanıklı olmalı)
- Yüksek korozyonu dayanımı (malzeme çeşitli ortamlarda korozyona dayanıklı olmalı)

Uçak üretiminde aşağıdaki temel malzemeler kullanılmaktadır

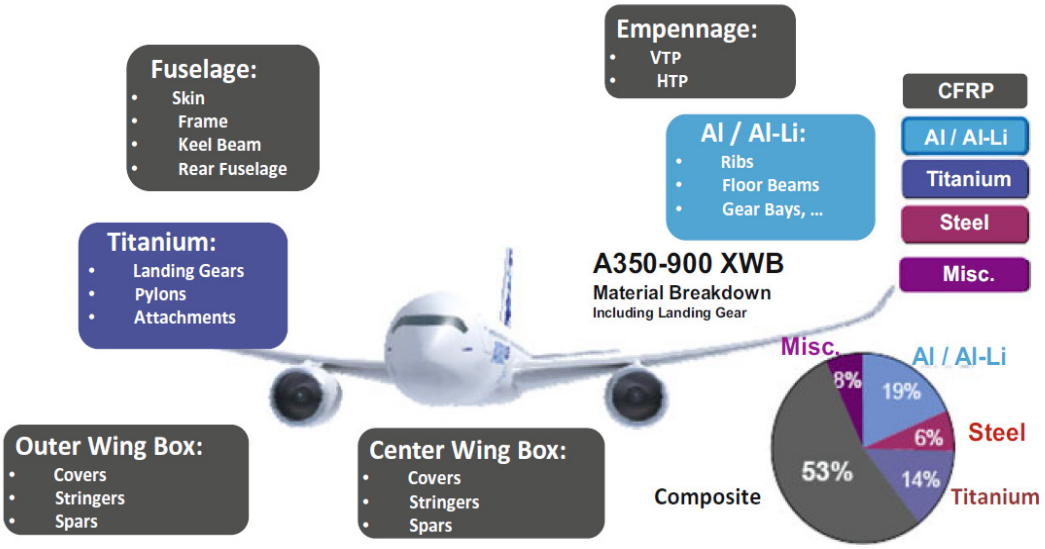
- *Alüminyum Alaşımları / Magnezyum Alaşımları*
- *Çelikler / Paslanmaz Çelikler*
- *Ti Alaşımları (Ti-6Al-4V)*
- *Ni Alaşımları / Süperalaşımlar*
- *Kompozit Malzemeler (Termoset veya Termoplastik Polimer Matrisli Kompozitler)*

Aşağıdaki Şekil 2.6'da genel olarak uçaklarda kullanılan mühendislik malzemelerinin yüzdelik dağılımı görülmektedir. Görüldüğü gibi uçak yapımında hafifliğin ve mulavemetin çok fazla önem taşımasından dolayı kompozit malzemeler önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca hafif olmalarından dolayı alüminyum ve özellikle titanyum metallerinin kullanımı da giderek artmaktadır. Yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı çelik kullanımı artmamaktadır.



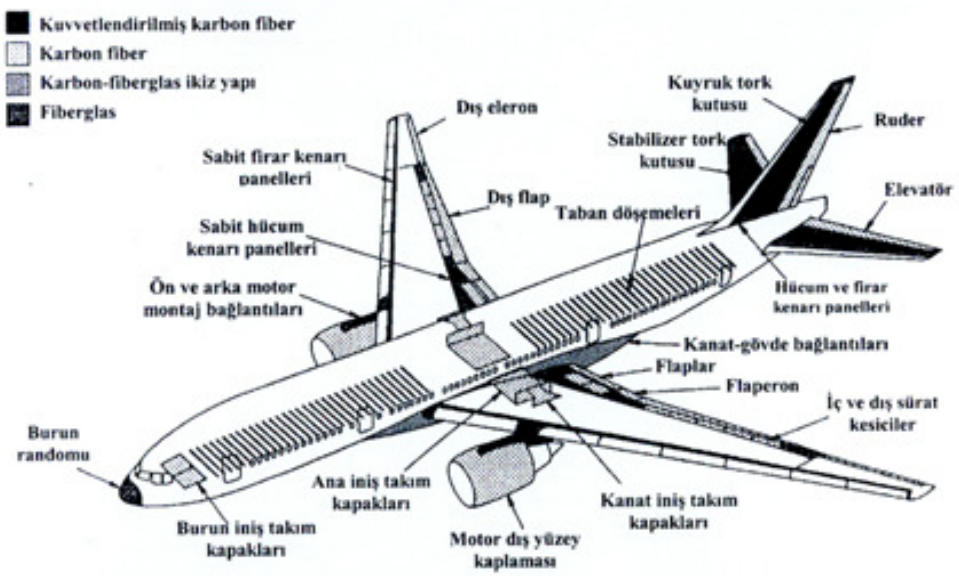
Şekil 2.6. Uçaklarda kullanılan malzemelerin dağılımı [1]

Aşağıdaki Şekil 2.7'de uçaklarda kullanılan çeşitli mühendislik malzemeleri ve kullanılan ilgili mühendislik malzemelerinin uçak yapısı üzerindeki başlıca kullanım alanları ve toplam uçak ağırlığındaki yüzdelik oranları topluca görülmektedir.



Şekil 2.7. Uçaklarda kullanılan malzemeler [9]

Aşağıdaki Şekil 2.7'de tipik bir Boeing uçakta kullanılan kompozit malzemeler ve kompozit malzemelerin uçak yapısı üzerindeki başlıca kullanım alanları şematik olarak çizilmiş şekilde görülmektedir.

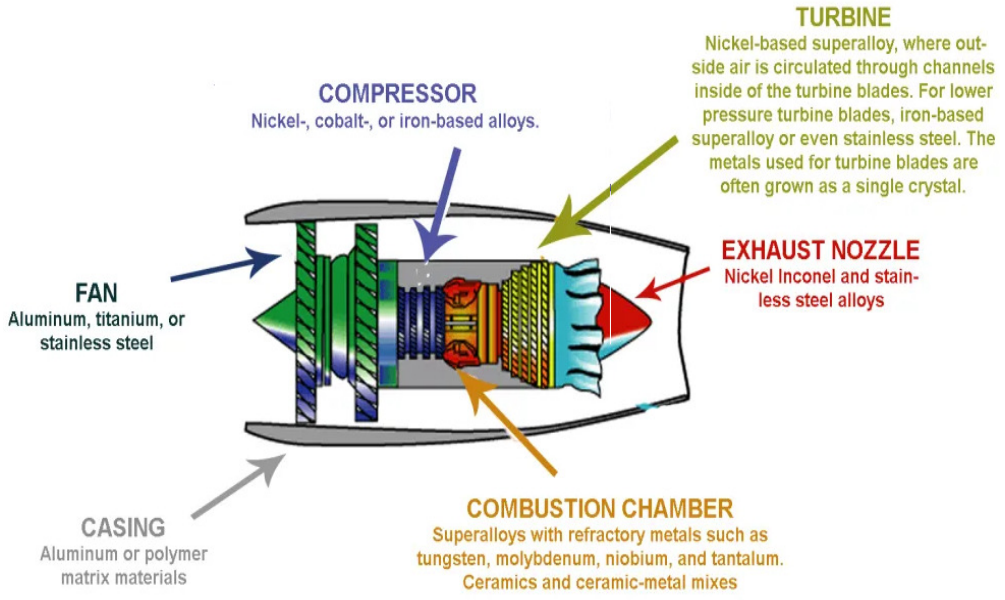


Şekil 2.8 Boeing uçaklarında kompozit malzemeler [5]

Uçak motorlarında en yaygın olarak Ti alaşımları (Ti-6Al-4V, Ti-8Al-1Mo-1V), Ni esaslı süperalaşımlar (Inconel 718, Hastalloy X, Nimonic 263), çelikler kullanılmaktadır. Genellikle uçak motoru ağırlıkça % 50 oranında Ni alaşımlarından oluşmaktadır. İlk zamanlarda kullanılan Co esaslı süperalaşımların yerini nispeten daha ucuz olan Ni alaşımları almıştır. Örneğin Inconel 718 uçak motorunda en sık kullanılan türbin kanatçığı malzemesidir. Yanma bölgesinde genellikle Ni alaşımları (süperalaşımlar) veya belirli durumlarda Ti alaşımları kullanılmaktadır. Ti alaşımları nispeten motorun daha soğuk kısımlarında kullanılmaktadır (fan, kompresör). Motorun nispeten soğuk olun fan kasası gibi kısımlarında kompozit malzemeler (carbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitler) kullanılmaktadır. Ayrıca motor yapısında sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde metal yüzeylere seramik esaslı termal bariyer kaplama yapılmaktadır.

Uçak motorlarında çeşitli malzemeler kullanılmakta olup, kullanılacak malzemelerin aşağıdaki özellikleri göstermesi beklenmektedir;

- Yüksek sıcaklık oksidasyonuna direç
- Yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı direnç
- Korozyona karşı dayanım
- Yorulma dayanımıyğksek olmalıdır
- Yüksek mukavemet olmalıdır
- Yüksek Darebe direnci / Enerji absorblama kabiliyeti



Şekil 2.9: Turbo-jet motorda kullanılan malzemeler [7]

2.3. ŞEKİL BELLEKLİ MALZEMELER

Şekil bellekli (şekil hafızalı) malzemeler yeni bir mühendislik malzeme türüdür. Şekil bellekli malzemeler öncelikle östenit faz bölgesinden aniden soğutularak martenzit faz yapısına dönüştürülmekte, daha sonra martenzit faz yapısında deformasyona uğratılmakta (ikinci şekil), daha sonra ise tekrar ısıtılarak östenit faza dönüşmek suretiyle ilk şekillerine geri dönebilen malzemelerdir.

Şekil bellekli malzemeler;

- Sıcaklık etkisi ile dönüşenler (Geleneksel)
- Gerilim/kuvvet etkisi ile dönüşenler (Süperelastik)

Martenzit dönüşümü (difüzyonsuz dönüşüm) :

- Termoelastik dönüşüm. Termoelastik martensitik dönüşüm iki-sınırlarında ikizlenme ile meydana gelmektedir ve ilk şekle geri dönebilmektedir.
- Termoelastik olmayan dönüşüm. Termoelastik olmayan martensitik dönüşüm dislokasyonların kayması ile meydana gelmektedir. Termoelastik olmayan martensitik dönüşüm ilk şekle geri dönemez.

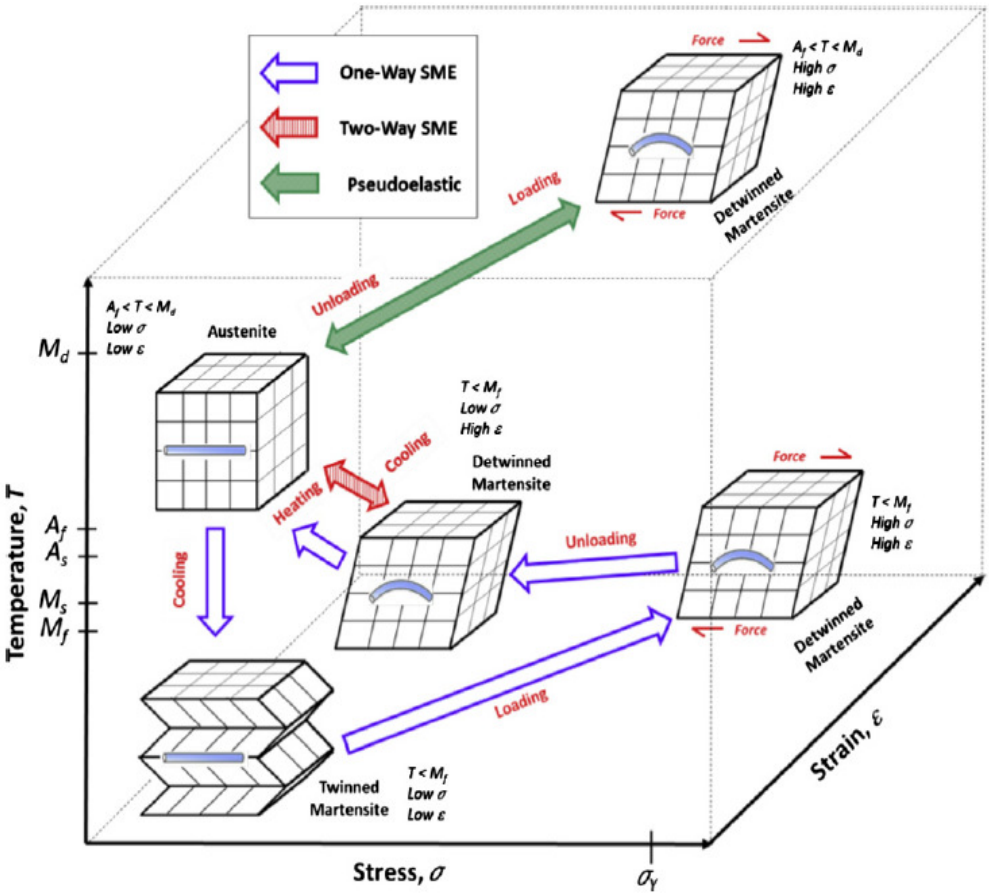
Genel olarak metallerde 2 çeşit faz dönüşümu bulunmaktadır;

- Masif dönüşüm (difüzyonlu)
- Martensitik dönüşüm (difüzyonsuz)

Alaşımların Şekil bellek davranışı göstermesi için gerekli temel şartlar

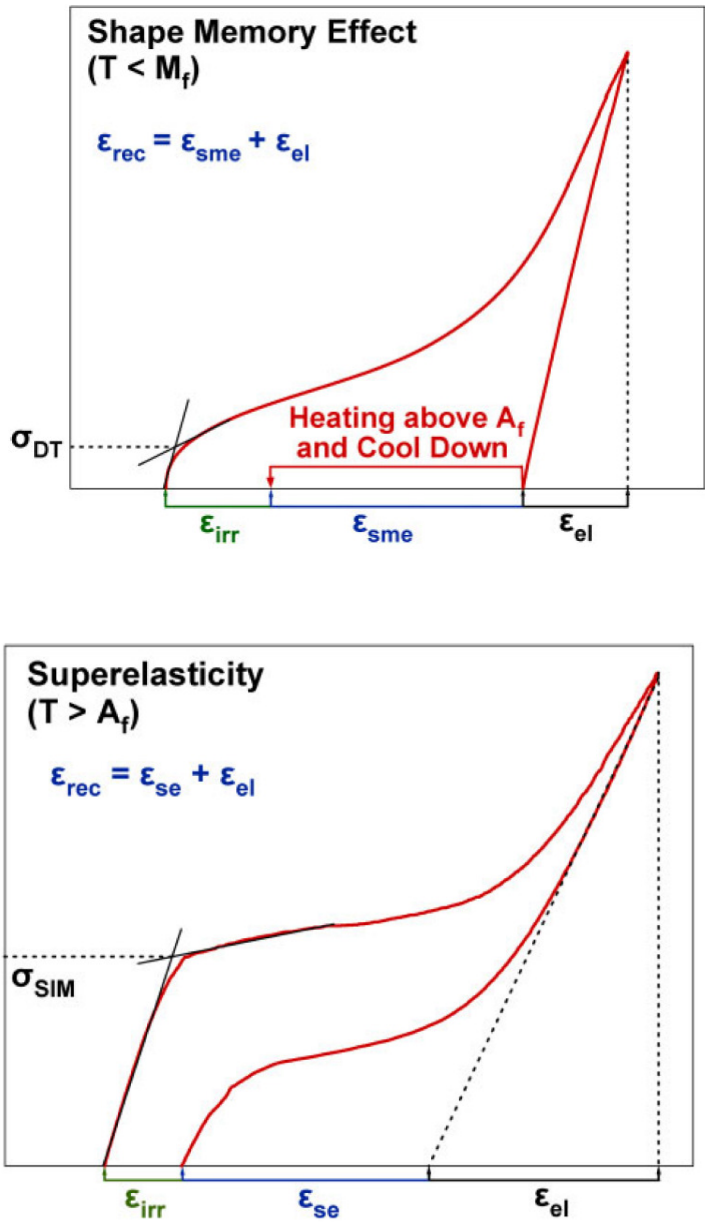
- Martensitik dönüşüm termoelastik olmalı
- Mikroyapıda düzenlenme olmalı
- Deformasyon ikizlenme ile meydana gelmeli.
- İkizlenme-yeniden ikizlenme oranı eşit olmalı [10-17].

Aşağıdaki Şekil 2.10'da şekil bellekli alaşımlarda temel fazlar, kristal yapılar ve fazların/kristal yapıların dönüşümlerini gösteren şematik olarak çizilmiş sıcaklık-gerinim-gerilme grafiği görülmektedir.



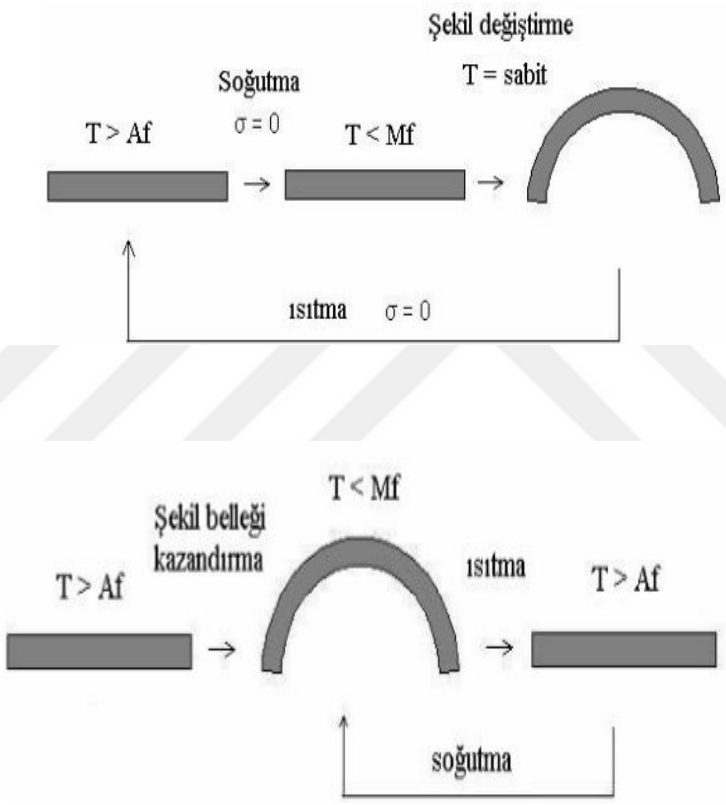
Şekil 2.10: Şekil bellekli alaşımlarda fazlar ve kristal yapı [13]

Aşağıdaki Şekil 2.11'de şekil bellekli alaşımlarda a) tek yönlü geleneksel şekil bellek etkisinin görüldüğü alaşımlarda şematik olarak çizilmiş gerilim-gerinim eğrisi ve b) süperelastik davranışın (kuvvet/gerilim etkili şekil bellek) görüldüğü alaşımlarda şematik olarak çizilmiş gerilim-gerinim eğrisi görülmektedir.



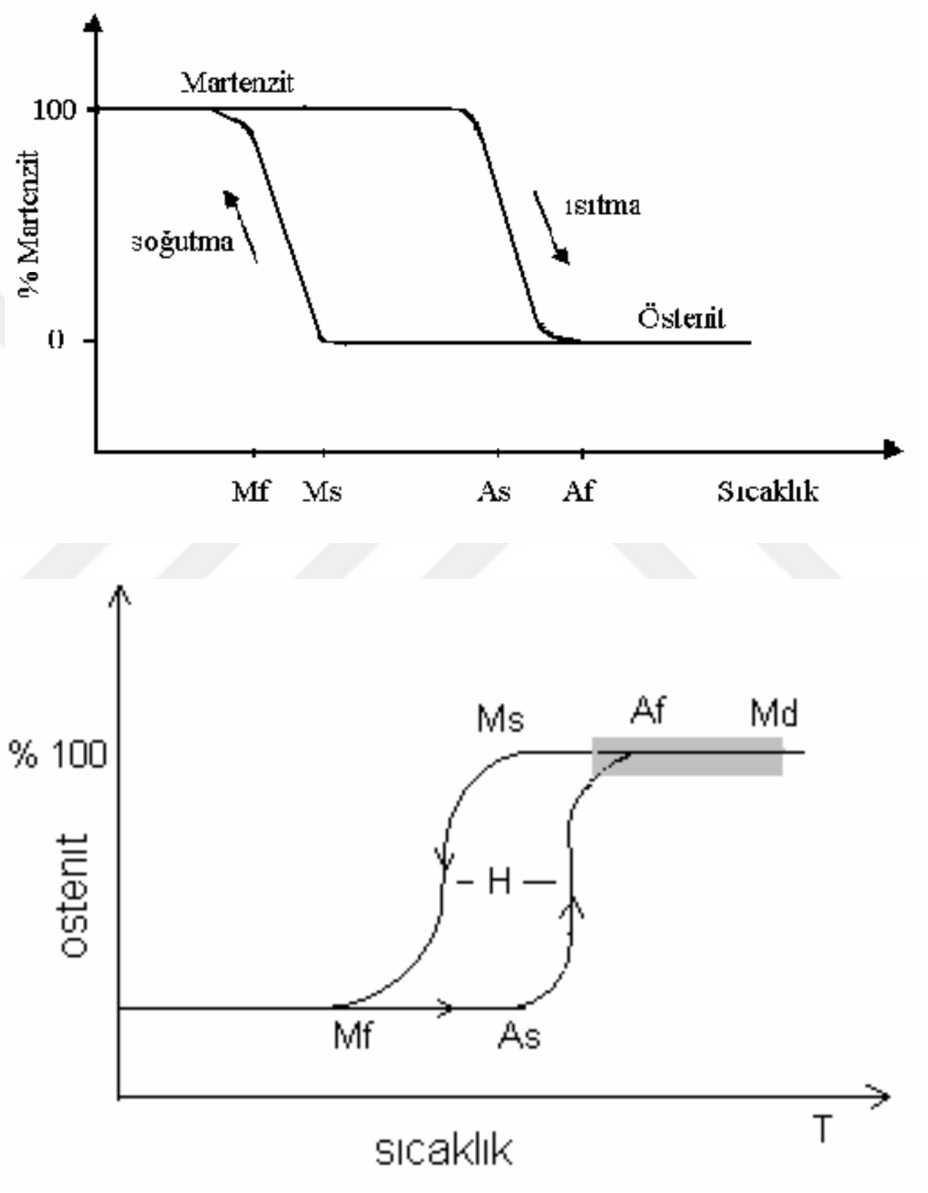
Şekil 2.11: a) Tek yönlü şekil bellek etkisi ve b) Superelastik davranış [14]

Aşağıdaki Şekil 2.12'de şekil bellekli alaşımlarda a) tek yönlü şekil bellek davranışı ve b) çift yönlü şekil bellek davranışının şematik olarak çizilmiş halleri görülmektedir. Kullanım alanına bağlı olarak bazı uygulamalarda tek-yönlü şekil bellekli alaşımlar tercih edilmekte, belirli bazı uygulamalarda ise çift yönlü şekil bellekli alaşımların kullanılması gerekmektedir. Genel olarak çift yönlü şekil bellekli alaşımlara şekil bellek eğitimi ısıl işleminin uygulanması gerekmektedir.



Şekil 2.12. a) Tek yönlü ve b) çift yönlü şekil bellek davranışı [18]

Aşağıdaki Şekil 2.13'de Ni-Ti esaslı şekil bellekli alaşımda a) geleneksel şekil bellek (sıcaklık etkili) alaşımlarda martenzitik faz dönüşümü ve b) süperelastik davranışın (gerilme etkisi şekil bellek) görüldüğü alaşımlarda süperelastik davranış bölgesi görülmektedir.



Şekil 2.13. a) Martenzitik faz dönüşümü ve b) süperelastik bölge [18]

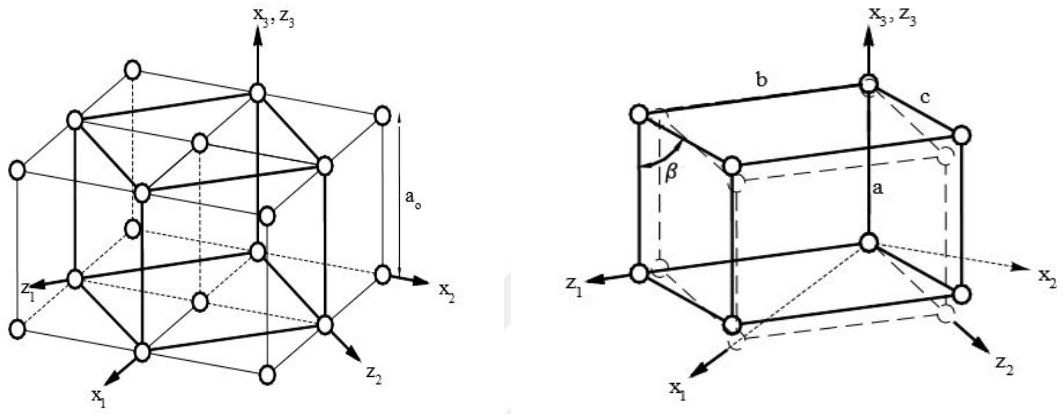
Nitinol (Ni-Ti)

Ni-Ti alaşımı ilk olarak 1961 yılında Naval Ordinance Laboratuvarında (ABD) geliştirilmiştir. Nitinol (Ni-Ti alaşımı) kullanımı giderek artan, birçok mühendislik uygulamasında kullanılan çok önemli ve yenilikçi bir mühendislik malzemesidir. Nitinol (Ni-Ti alaşımı) geleneksel şekil bellek davranışı ve süperelastiklik davranışı göstermektedir. Nitinol (Ti-Ni) atomik oranda eşit miktarda Ti ve Ni elementlerinin (% 0 Ti ve % 50 Ni) karışımından oluşmaktadır. Nitinol (Ti-Ni) melzemelerin oldukça faydalı olan mühendislik özellikleri geri-dönüşümlü martensitik faz dönüşümü gösterme davranışının bir sonucudur. Cr, Cu, Mn, Fe, Co, V, Al gibi çeşitli elementleri Ni-Ti alaşımının martenzit-östenit faz dönüşüm sıcaklığını düşürür. Ayrıca alaşım elementlerinin ilavesi ile alaşımın mikroyapısında çeşitli intermetalik çökeltiler meydana gelir. Aşağıdaki tablo 2.1'de Ni-Ti esaslı şekil bellekli malzemenin çeşitli özellikleri görülmektedir.

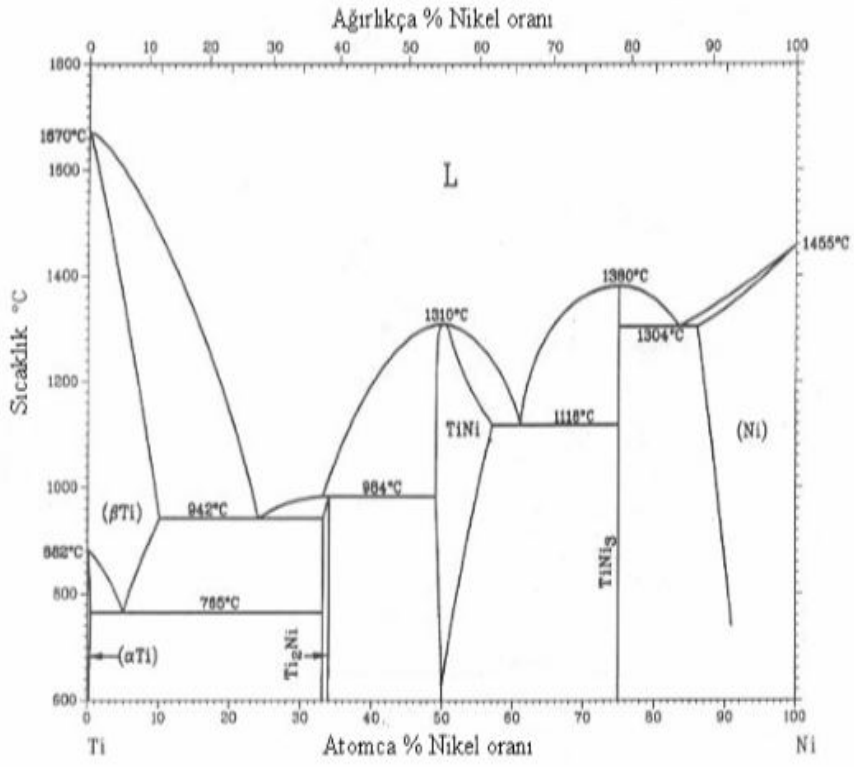
Tablo 2.1: NiTi malzemenin özellikleri [13]

Property	Symbol	Units	Value	
			Martensite	Austenite
Corrosion Resistance	-	-	Similar to 300 series SS or Ti-alloy	
Density	ρ_D	kg/m^3	6450–6500	
Electrical Resistivity (approx.)	ρ_R	μΩ cm	76–80	82–100
Specific Heat Capacity	c	J/kg K	836.8	836.8
Thermal Conductivity	k	W/m K	8.6–10	18
Thermal Expansion Coefficient	α	m/m K^{-1}	6.6×10^{-6}	11.0×10^{-6}
Ultimate Tensile Strength	σ_{UTS}	MPa	895 (Fully annealed)/1900 (Hardened)	
Young's Modulus (approx.)	E	GPa	28–41	75–83
Yield Strength	σ_Y	MPa	70–140	195–690
Poisson's Ratio	ν	-	0.33	
Magnetic Susceptibility	χ	μemu g	2.5	3.8

Aşağıdaki Şekil 2.14'de martenzitik faz dönüşümü öncesi (sol) ve faz dönüşümü sonrası (sağ) Ti-Ni alaşımının kristal yapısı şematik olarak görülmektedir. Şekil 2.15'de ise atomca ve ağırlıkça Ni-Ti faz/denge diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.14: Martenzitik dönüşüm öncesi (sol) ve sonrası (sağ) kristal yapı [18].



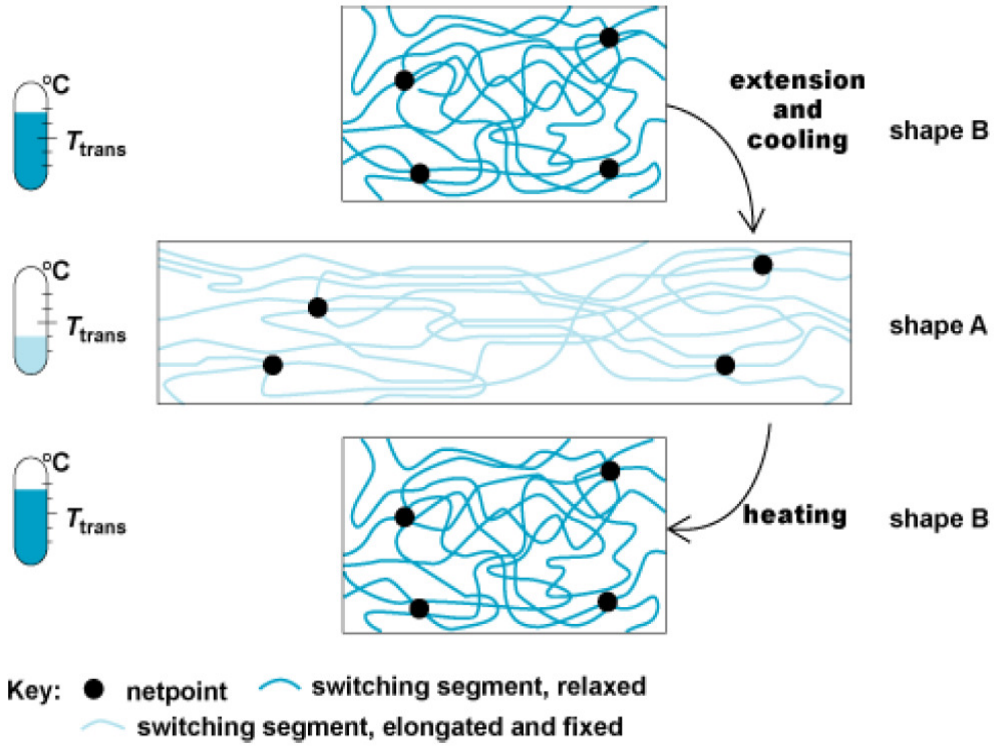
Şekil 2.15: Ti-Ni Faz Diyagramı [18]

Şekil Bellekli Polimerler

Şekil bellekli polimerler akıllı malzeme sınıfında yer almaktadır. Dışarıdan uygulanan bir uyarıya (sıcaklık) cevap verebilen (şekil değiştirebilen) malzemelerdir. Şekil bellekli polimerler malzemelerde, şekil bellek davranışı aynı anda iki fazlı bir yapının bulunması ile açıklanmaktadır. Dönüşüm sıcaklığının altında ve üstünde polimerin elastisite modülünde büyük değişim olması esasına dayanmaktadır. Genel olarak yapıda bulunan çapraz kovalent bağlar sert fazı oluşturmaktadır. Ayrıca, dönüşüm sıcaklığının ani olması da önem taşımaktadır.

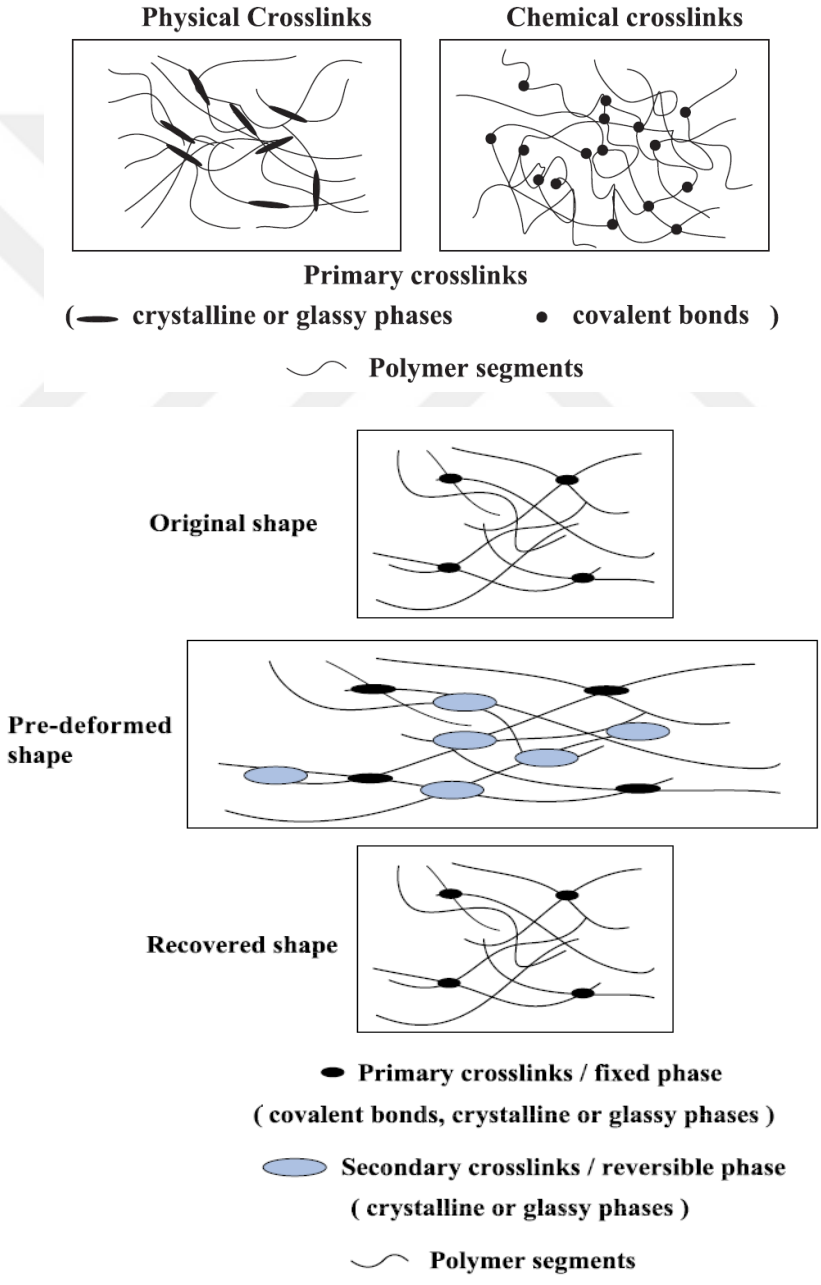
- Sabitleyici faz (sert bölge/segment), kalıcı şekli meydana getirebilir.
- Geri-dönüşümlü faz (yumuşak bölge), geçici fazı meydana getirebilir.

Aşağıdaki Şekil 2.16'da polimer esaslı şekil bellekli malzemelerde sıcaklığa bağlı olarak polimerin gösterdiği şekil bellek davranışı şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.16: Polimerlerde şekil bellek davranışı [10]

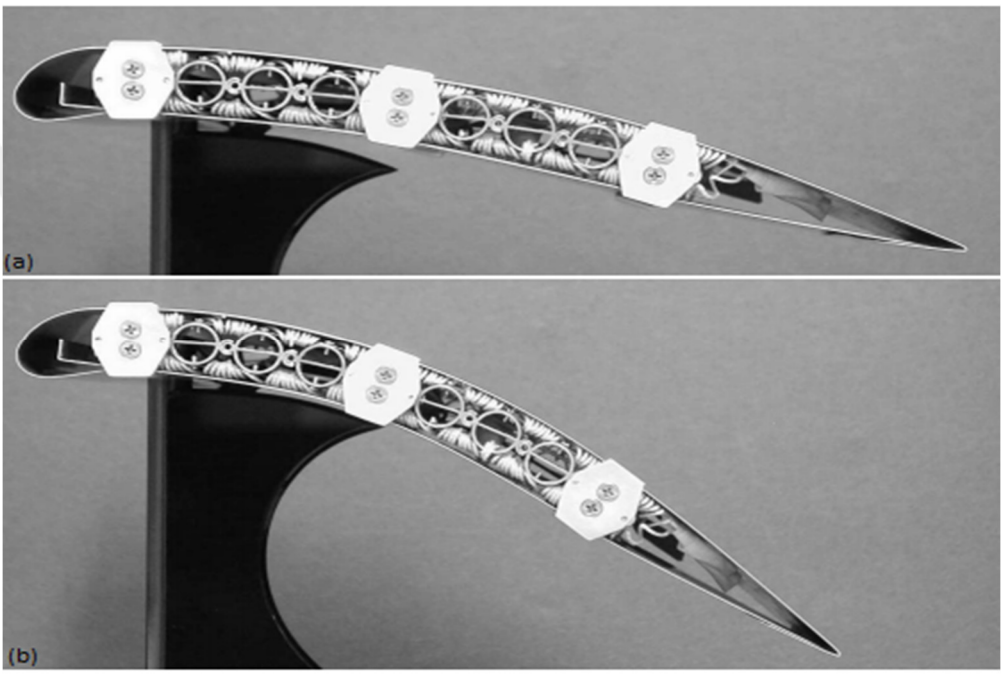
Aşağıdaki Şekil 2.17'de genel olarak polimer esaslı şekil bellekli malzemelerde şekil bellek davranışı şematik olarak görülmektedir. İlk şekil, ön deformasyon uygulanmış parçanın şekli ve geri-dönüşüm sonrası şekiller görülebilir. Ayrıca, çapraz bağlanma türleri şematik olarak görülmektedir. Fiziksel çapraz bağlanma ve kimyasal çapraz bağlanma durumuna göre farklılıklar görülebilmektedir.



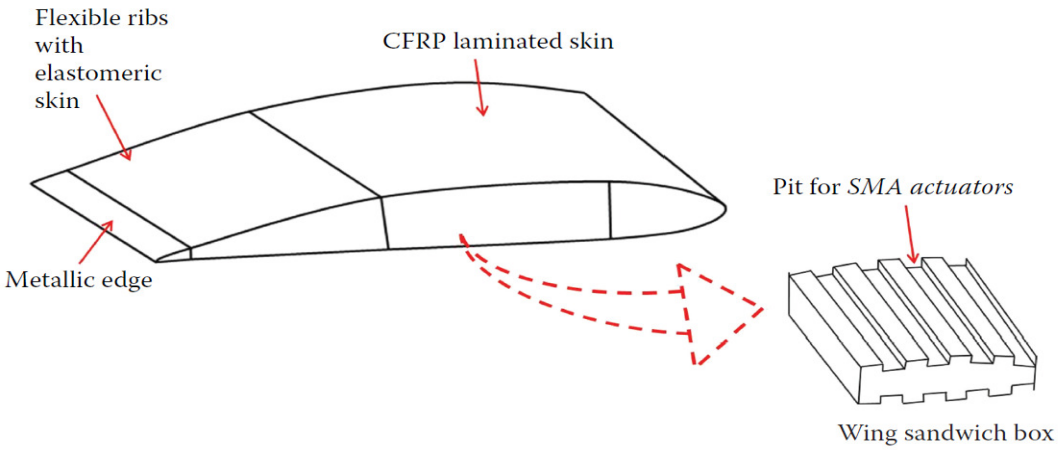
Şekil 2.17: Şekil bellekli polimerler [15]

Kullanım Alanları

Şekil bellekli alaşımların kullanıldığı önemli bir mühendislik uygulama örneği aşağıdaki şekilde de görülen yüksek oranda şekil değiştirebilen kanat tasarımıdır. Bu uygulamadaki temel amaç uçağın uçuşu esnasında oluşan farklı koşullara uyum sağlayabilen yüksek oranda şekil değiştirme kabiliyeti olan bir kanat üretimidir.



Şekil 2.18. Şekil değiştirebilen kanat [19]



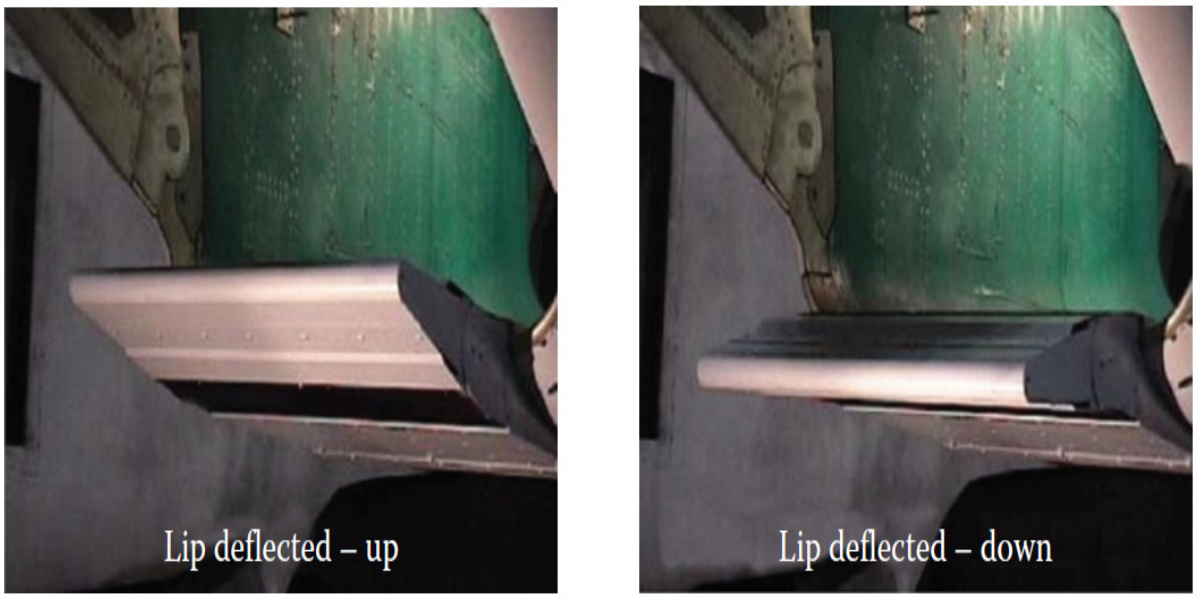
Şekil 2.19. Şekil değiştirebilen kanat mekanizması [2]

Aşağıdaki şekil 2.20'de NASA-Boeing ortaklığı tarafından geliştirilen gürültü azaltıcı şekil bellekli şekil değiştirebilen hareketli şeritler (chevron) görülmektedir. Geliştirilen alaşım ağırlıkça % 60 Ni ve ağırlıkça % 40 Ti içermekte olup, geliştirilen bu alaşım ile üretilen şekil değiştirebilen şeritler motorun giriş kısmının iç yüzüne monte edilmiştir. Farklı yüksekliklerde ve farklı hızlarda farklı sıcaklıklar oluştuğundan şekil bellekli alaşımda şekil değişimi oluşmaktadır. Genel olarak, yaklaşık olarak % 8 gerinim (strain/deformasyon) değerleri elde edilebildiği ifade edilmektedir.



Şekil 2.20. Gürültü azaltıcı şekil bellekli hareketli şerit (chevron) [20]

Aşağıdaki Şekil 2.21'de bir uçağının motor giriş kısmında kullanılan şekil bellekli şekil değiştirebilen kulakçıklar (intake lip) görülmektedir (şekil bellekli aktüatör). Şekil bellekli yüksek oranda şekil değiştirebilen kulakçıklar ile yaklaşık olarak % 6-8 gerinim (strain/deformasyon) değerleri elde edilebilmektedir.



Şekil 2.21. Motor giriş kulakçıkları [2]

Şekil 2.22'de NASA (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi) tarafından geliştirilen ve deneme uçuşunu yapmış olan şekil değiştiren (adaptive) kanatlara sahip bir uçak yapısı görülmektedir. Üretilen uçak manevra yaptığı sırasında panellerin sıcaklıkları değiştirilmekte ve panellere 0-70º arasında değişen şekil değişimi verilmektedir.



Şekil 2.22. Şekil değiştirebilen kanat [21]

2.4. LITERATÜR ÇALIŞMASI

Jabur ve diğerleri [22] şekil bellekli Ni-Ti alaşımı numuneleri toz metalurjisi yöntemi ile üretmişler ve çeşitli özelliklerini incelemişlerdir. Basıncın numunelerin mekanik özelliklerine etksisini incelemişlerdir. Ayrıca, şekil bellekli Ni-Ti alaşımı içerisine yapılan Cr ilavesinin ve Al ilavesinin numunelerin mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Cr ilavesinin ve Al ilavesinin sertlik üzerinde düşük bir etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil bellekli Ni-Ti numunelere yapılan Cr ilavesinin ve Al ilavesinin dönüşüm sıcaklığını yükselttiğini tespit etmişlerdir. Genel olarak, şekil bellekli Ni-Ti içerisine yapılan Cr ilavesinin ve Al ilavesinin numunelerdeki gözenek miktarını düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Eda ve diğerleri [23] gerçekleştirdikleri çalışmada toz metalurjisi esaslı şekil bellekli Ti-Ni alaşımı numuneleri incelemişlerdir. Ni-Ti alaşımı numunelere mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla yaklaşık olarak % 2 oranında Co ilave etmişlerdir. Co ilaveli şekil bellekli Ti-Ni alaşımı numuneler yüksek şekil bellek özelliği göstermişir. Bu arada numunelerin akma mukavemeti değerleri sabit kalmıştır.

Yaşar [24], Ti-Ni alaşımlarının üretmiş ve karakterize etmiştir. Numunelere 925 °C sıcaklıkta 30 dakika çözeltiye alma uygulanıp ardından su verilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen numunelerin yeterli bir şekil bellek davranışı gösterdiği belirtilmiştir.

Aydoğmuş [25], gözenekli Ti-Ni alaşımının süperelastiklik ve şekil bellek davranışı gösterdiğini göstermiştir. Çalışma kapsamında sinterlenmiş numunelere 400 °C sıcaklıkta 60 dakika yaşlandırma yapılmıştır. Çözeltiye almaya gerek duymamışlardır. Ni oranının 50.5 % (atomik) düşük olduğunda yaşlandırmanın mümkün olmadığı belitmişlerdir.

Wang [26] termomekanik şekil bellek eğitim sıcaklığının iki-yönlü şekil bellek özelliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında Ti-Ni ve Ti-45Ni-5Cu şekil bellekli alaşımı yaylar ile gerçekleştirmişlerdir.

Aköz [27] şekil bellekli Ni-Ti alaşımını toz metalürjisi ile üretmiş ve şekil bellek özelliklerini araştırmıştır. Alaşımların mekanik özelliklerini incelemek için, 3-nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Numuneler 1200 ºC sıcaklıkta 90 dakika sinterlenmiştir.

Tanış [28], şekil bellekli Ni-Ti tozlarına, % 1 oranında Ti katmıştır. Ayrıca % 6 Cu katılarak alaşımlar üretilmiştir. Ham numuneler 1050 °C de sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerin mikroyapı analizlerinde şekil bellek etkisi için gerekli olan martenzit, östenitik, ve Ni4Ti3 fazlarının bulunduğu görülmüştür.

El-Bagoury [29], şekil bellekli Ni-zengin Ni-Ti ve Ni-Ti-Co (4 % Co, 47 %Ni ve 49 %Ti) alaşımlarını inceliştir. Yaşlandırma işleminin mikroyapı ve martensitik dönüşüm sıcaklığına etkisini incelemiştir. Yaşlandırma işlemini 250, 350, 450 ve 550 °C sıcaklıkta gerçekleştirmiştir. Yaşlandırma sonucu mikroyapının martenzit ve Ti2Ni çökeltilerinden oluştuğunu tespit etmiştir.

Young [30] Sn ilavesinin şekil bellekli Ni-Ti alaşımlarına etkisini incelemiştir. Ni-Ti-Sn alaşımlarının özellikle düşük kullanım sıcaklıklarında Ni-Ti, Ni-Ti-Co, Ni-Ti-Nb ve Ni-Ti-Cr alaşımlarına ekonomik bir alternatif şekil bellekli alaşım olduğunu ifade etmektedir.

Sui [31] şekil bellekli Ni-Ti-Nb-Co alaşımının özelliklerini incelemiştir. Co ilavesinin şekil bellek özellikleri, mikroyapı, faz dönüşüm sıcaklığı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Co ilavesi ile faz dönüşüm sıcaklığını düştüğünü ifade etmiştir. Alaşımın akma mukavemetinin de Co ilavesi ile arttığını ifade etmiştir.

Young [32] yüksek sıcaklık amaçlı şekil bellekli Ni-Ti-Hf alaşımında (50.3 % Ni, 29.7% Ti ve 20 % Hf) sıcaklığın etkisini incelemiştir. Kırılma tokluğu değerlerinin Ni-Ti alaşımlarından süşük olduğunu tespit etmişlerdir.

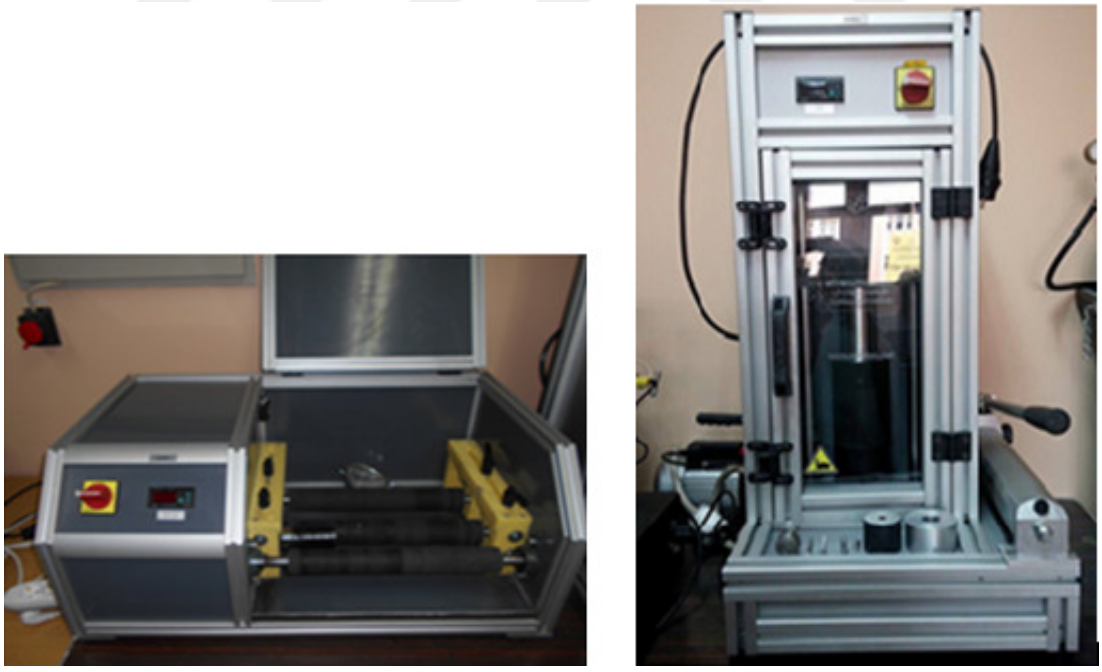
Salvetr [33] Mg ilavesinin şekil bellekli Ni-Ti alaşımının özelliklerine etkisini incelemiştir. % 5 Mg ilavesinin Ni-Ti alaşımının yapısal kararlılığını arttırdığını tespit etmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. NUMUNE ÜRETİMİ

Toz Metalurjisi Yöntemi

Bu tez kapsamında, şekil bellekli Ti-Ni easlı alaşım üretiminde yaklaşık 34 µm boyutunda ve metal tozları kullanılmıştır. Öncelikle, metal toz karışımları hedeflenen alaşımın bileşimine göre belirlenen miktarlarda tartılmış ve mekanik alaşımlama yöntemiyle bilyeli değirmende hazırlanmıştır. Öğütücü olarak 3 mm çapında zirkonya bilye kullanılmıştır. Mekanik alaşımlama sonrasında, ham numunelerde yeterli mukavemet elde etmek için toz karışımına yaklaşık % 1-3 polivinilalkol ilave edilmiştir. Daha sonra, metal toz karışımı aşağıda görülen tek eksenli hidrolik preste (MSE, Türkiye), 200-250 MPa basınç altında preslenerek ve ham numuneler elde edilmiştir.



Şekil 3.1: Bilyeli değirmen ve hidrolik pres

Presleme işleminden sonra elde edilen silindirik ham numuneler belirli sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi boru tipi yatay fırında (MTI, USA) vakum ortamında gerçekleştirilmişir. Üretilen ham numuneler 1200 °C sıcaklıkta 60 dakika süre ile sinterlenmiştir. Şekil 3.2'de şekil bellekli ham numunelerin sinterlendiği yatay boru tipi fırın ve vakum pompası görülmektedir.



Şekil 3.2: Sinterleme fırını

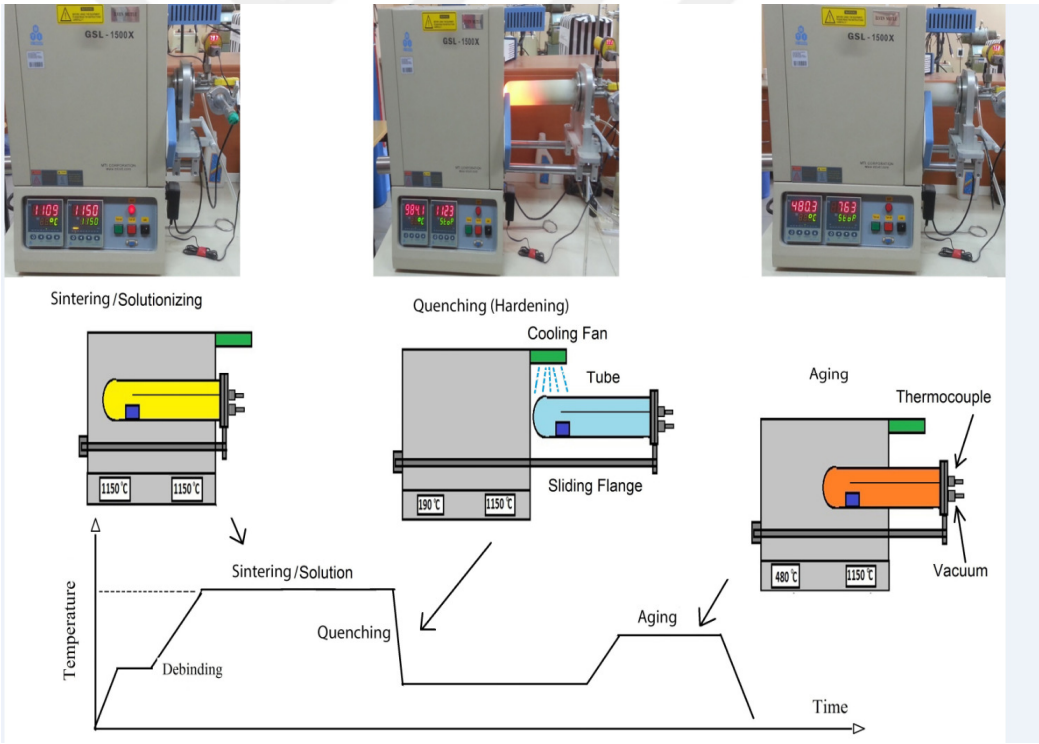
Tablo 3.1'de çalışma kapsamında toz metalurjisi (pres-sinter) yöntemi ile üretilen Ni-Ti esaslı şekil bellekli alaşımlarının kimyasal bileşimleri görülmektedir.

Tablo 3.1: Ti-Ni alaşımlarının kimyasal bileşimi

Alaşım	**Ti**	**Ni**	**Co**	**Nb**	**Cu**	**Al**	**Sn**	**Si**	**Cr**	**Mo**
Ti-Ni	50	50								
Ti-Ni	49	51								
Ti-Ni-Co	49	49	2							
Ti-Ni-Co	48	48	4							
Ti-Ni-Nb	49	49		2						
Ti-Ni-Cu	49	49			2					
Ti-Ni-Sn	49	49					2			
Ti-Ni-Si	49	49						2		
Ti-Ni-Cr	49	49							2	
Ti-Ni-Mo	49	49								2
Ti-Ni-Al	49	49				2				
Ti-Ni-Co-Cr-Sn	47	47	2				2		2	

Şekil Bellek Eğitimi

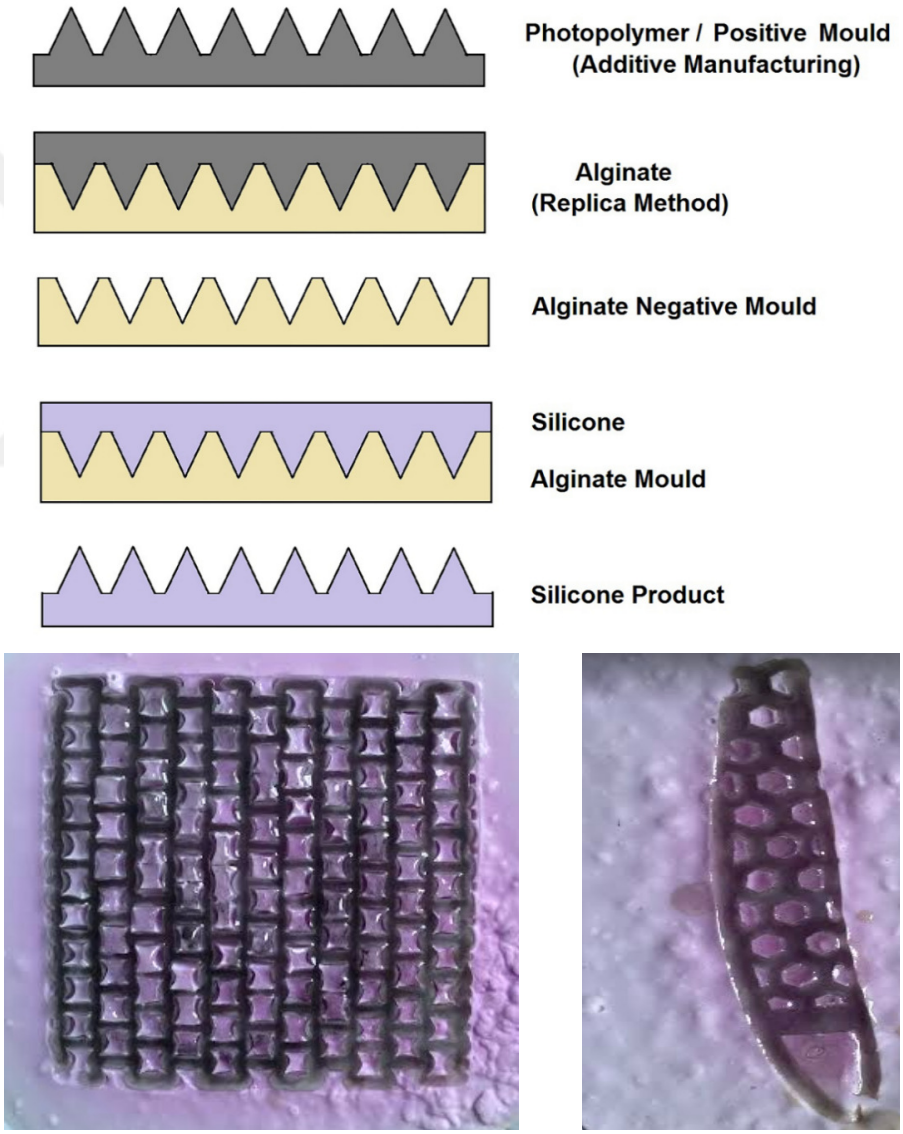
Aşağıdaki şekilde şekil bellekli alaşımlara sinterleme işlemi sonrasında uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi (şekil bellek eğitimi) görülmektedir. Bu işlem esnasında kayar flanşlı fırın kullanılmıştır. Sinterleme işlemi bittiğinde numunelerin içinde bulunduğu alümina tüp hızlıca fırının dışına çıkarılarak soğutucu fanın yardımı ile numunelerin hızla soğuması sağlanmıştır. Genel olarak sinterleme sonrası uygulanan bu işlemde soğutma hızı 1-3 ºC/s değerleri arasında elde edilmiştir. Tüp fırının çıkışında bulunan soğutucu fan soğutma işlemine yardımcı olmaktadır. Daha sonra tüp tekrar belirli bir mesafeye kadar fırın içerisine sokularak aynı fırın içerisinde 400 °C sıcaklıkta yaşlandırma yapılmıştır.



Şekil 3.3: Şekil bellek eğitimi

Replika Yöntemi

Çalışma kapsamında replika yöntemi kullanılarak şekil bellekli kompozit malzeme numuneleri üretilmiştir. Elastik aljinat kalıp malzemesi olarak kullanılmıştır (negative kalıp). Metal tozu (şekil bellekli Ti-Ni) takviyeli polimer (epoksi) matrisli kompozit malzemeler kalıp boşluğuna dökülmüştür.



Şekil 3.4: Replika yöntemi

3.2. KARAKTERİZASYON

Mikroyapı

Numune (alaşım) üretiminde kullanılan hammaddelerin (metal tozlarının) ve sinterlenmiş numunelerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Üretilen alaşımların mikroyapıları x-ışını difraksiyon analizi (Rigaku) ile de incelenmiştir.

Ham (sinterlenmemiş) ve sinterlenmiş alaşımların yoğunluk değerleri geometrik yöntem ile belirlenmiştir. Öncelikle silindir şeklindeki malzemelerin boyutları ölçülerek hacimleri belirlenmiştir. Daha sonra numuneler tartılmış ve yoğunluk hesaplanmıştır.

Mekanik Özellikler

Sinterlenmiş numunelerin mekanik özellikleri (akma mukavemeti, elastisite modülü) çekme-basma cihazı (Devotrans, Türkiye) ile incelenmiştir.

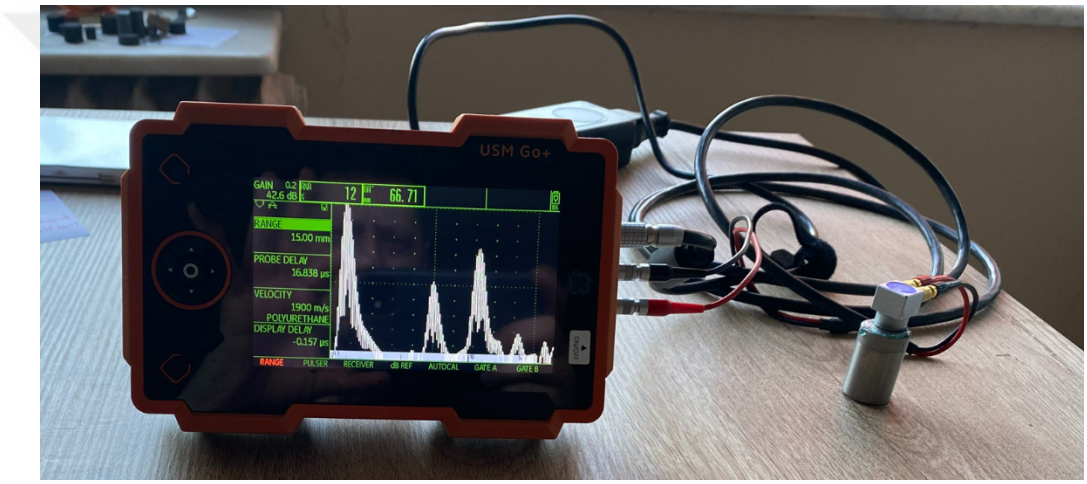


Şekil 3.5: Basma cihazı

Tahribatsız Muayene (Ultrasonik Test)

Numunelerin elastisite modüllerini belirlemek amacıyla ultrasonik hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir (General Electric, USM Go). Sinterlenmiş şekil bellekli Ti-Ni esaslı alaşımların elastisite modülü (E) aşağıdaki bağıntı yardımı ile hesaplanmıştır (V_T ve V_L ultrasonik boyuna/enine hız, ρ ise yoğunluktur).

$$E = \rho\, V_T^{\,2}\, \frac{3V_L^{\,2} - 4V_T^{\,2}}{V_L^{\,2} - V_T^{\,2}} \qquad (3.1)$$



Şekil 3.6: Ultrasonik test cihazı

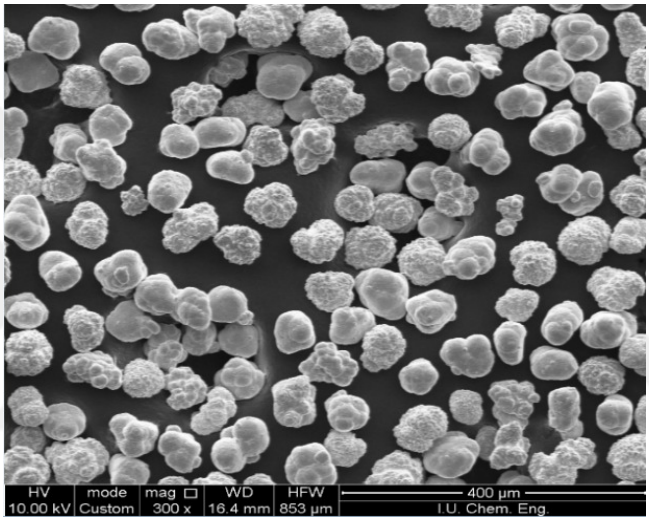
3.2.3. Elektrokimyasal Korozyon Özellikleri

Uçak malzemelerinin korozyon dayanımları da önem taşımakta olup, çeşitli ortamlarda belirli bir korozyon dirençlerinin bulunması gerekmektedir. Elektrokimyasal korozyon testleri potansiyostat (Interface, Gamry) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Hücre düzeneği olarak 3-elektrotlu elektrokimyasal korozyon ölçüm hücresi kullanılmıştır.

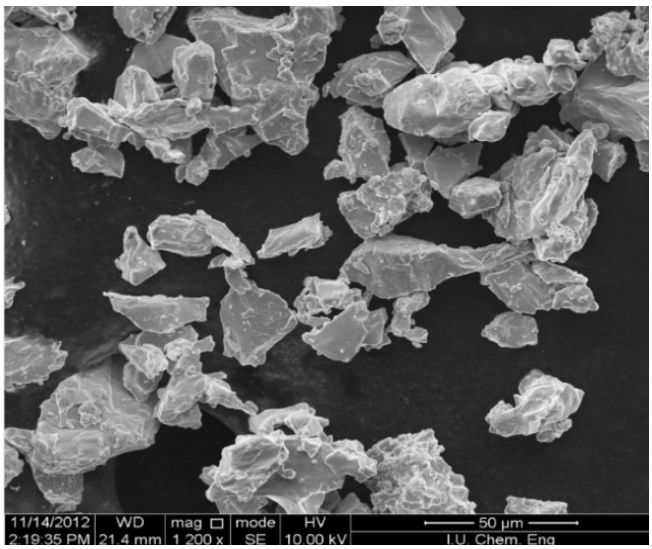
4. BULGULAR

4.1. MİKROYAPI

Şekilde 4.1'de şekil bellekli Ti-Ni easlı numune üretiminde kullanılan temel hammaddelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Tozların homojen, karmaşık şekilli ve belirtilen boyutlarda olduğu söylenebilir.



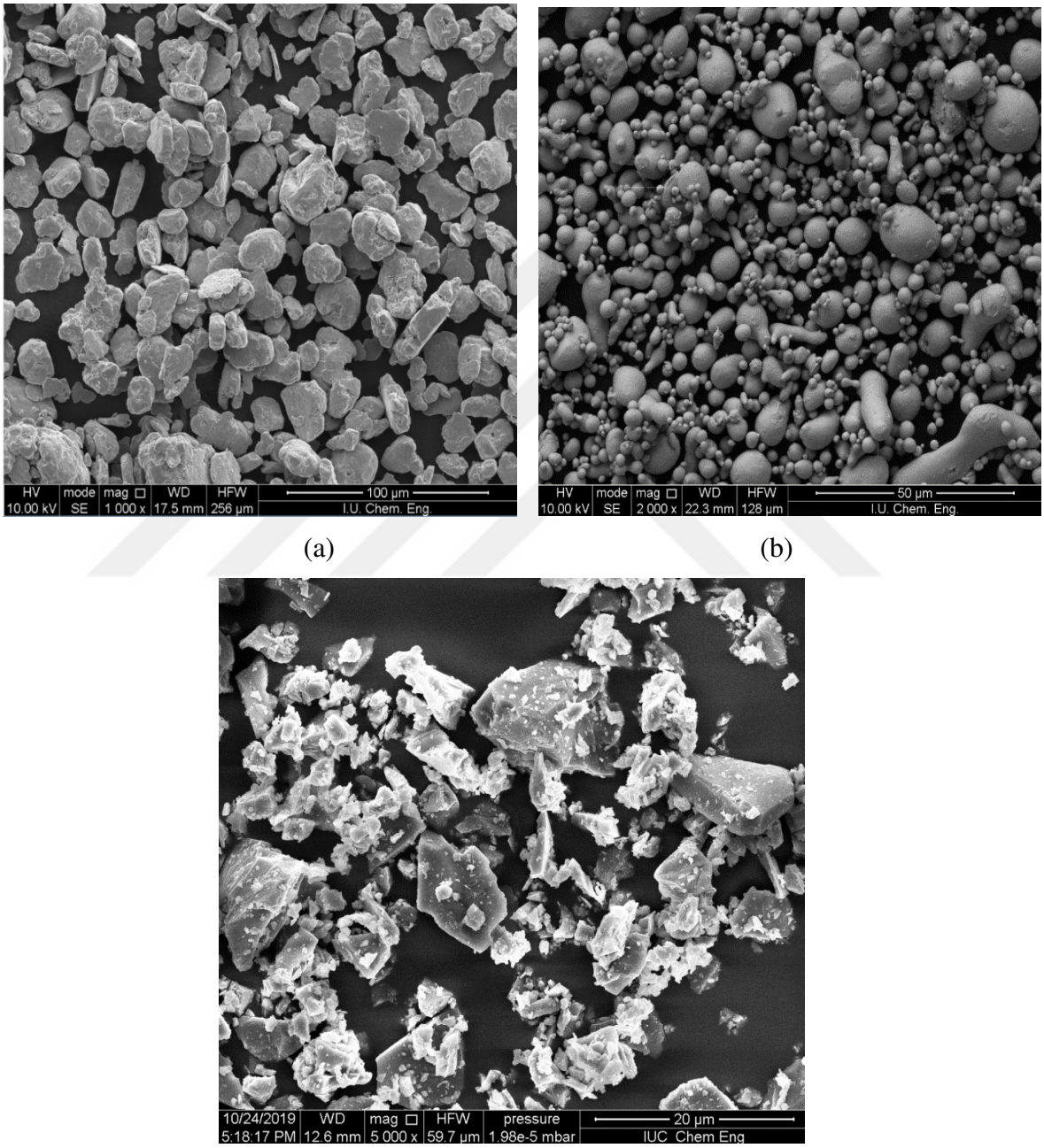
(a)



(b)

Şekil 4.1: Temel hammaddelerin SEM fotoğrafları a) Ni tozu, b) Ti tozu

Şekil 4.2'de şekil bellekli numune üretiminde kullanılan alaşım elementlerinin SEM ile çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğraflarından da görüldüğü gibi kullanılan metal tozlarının istenen boyutlarda, saf ve homojen dağılımda oldukları söylenebilir.

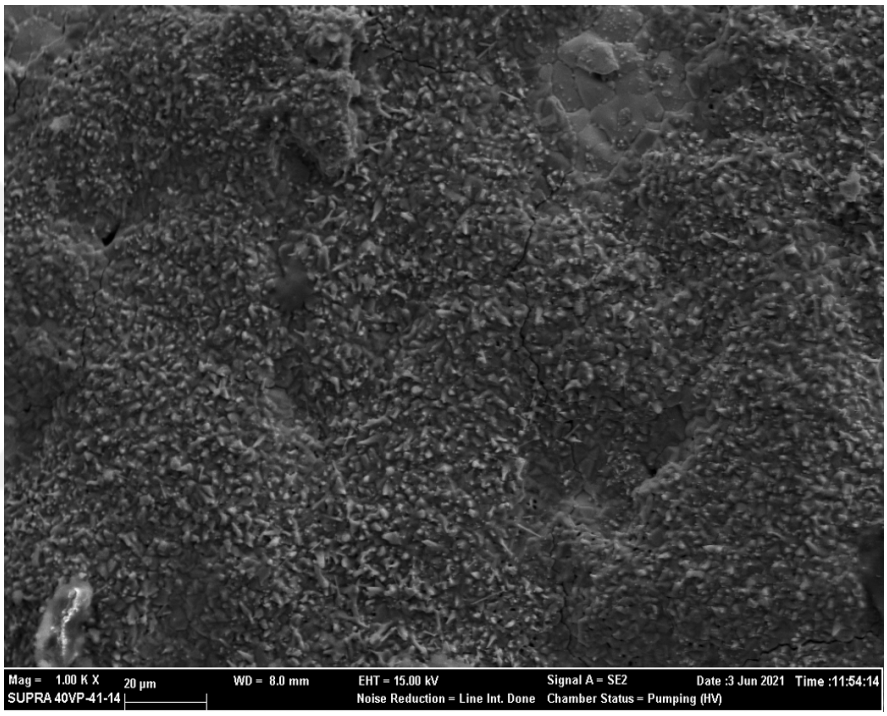


(a) (b)

(c)

Şekil 4.2: Alaşım elementlerinin SEM fotoğrafları of a) Co tozu, b) Sn tozu, c) Si tozu

Şekil 4.3'de sinterlenmiş şekil bellekli Ti-Ni-Co alaşımının kırık yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş resmi görülmektedir. SEM fotoğrafından görüldüğü gibi metal tozlarının birbiri ile istenen oranda difüzyon yolu ile sinterlendikleri anlaşılmaktadır. Ayrıca SEM fotoğrafına bakıldığında nununenin mikroyapısında alaşımın mekanik özelliklerini azaltan makro veya mikro gözenekler veya çatlak/porozite gibi kusurlar bulunmamaktadır.



Şekil 4.3: Sinterlenmiş Ti-Ni-Co alaşımının SEM fotoğrafı

4.2. MEKANİK ÖZELLİKLER

Tablo 4.1'de tez kapsamında toz metalurjisi ile üretilen Ti-Ni esaslı şekil bellekli alaşımların ultrasonik hız yardımıyla hesaplanmış elastisite modülü değerleri ve basma testi ile belirlenmiş elastisite modülü değerleri görülmektedir. Ultrasonik hız ölçümü ile belirlenen değerler ile basma testi ile belirlenen değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Tablo 4.1: Malzemelerin ultrasonik hız değerleri ve hesaplanan elastisite modülü değerleri

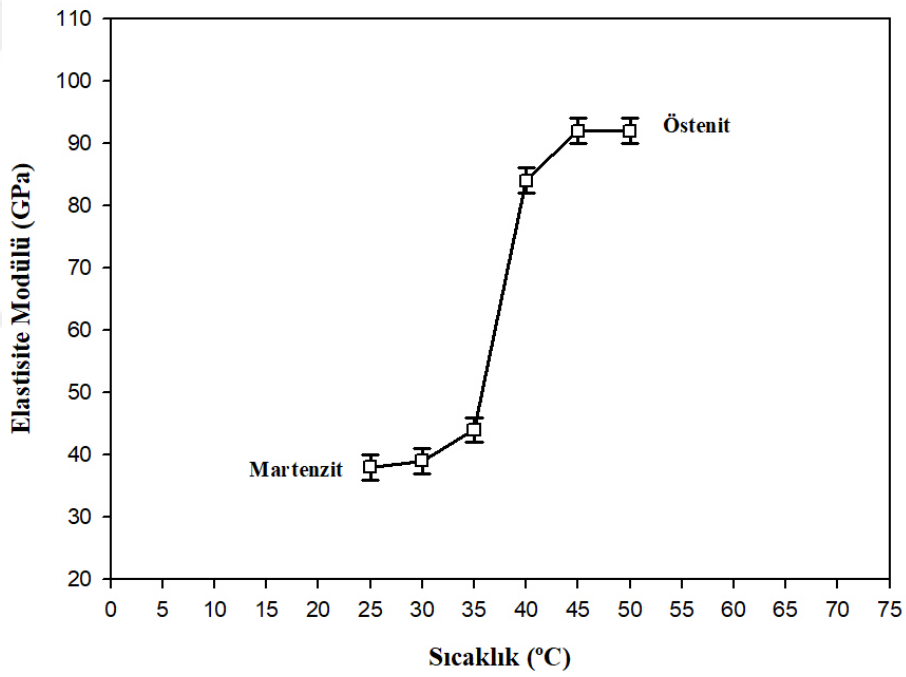
Alaşım	**Elastisite Modülü GPa (Ultrasonik)**	**Elastisite Modülü GPa (Basma)**
Ti-Ni	35	36
Ti-Ni	36	37
Ti-Ni-Co	37	40
Ti-Ni-Co	38	40
Ti-Ni-Nb	36	35
Ti-Ni-Cu	38	39
Ti-Ni-Sn	37	37
Ti-Ni-Si	36	37
Ti-Ni-Cr	39	42
Ti-Ni-Mo	39	41
Ti-Ni-Al	37	40
Ti-Ni-Co-Cr-Sn	38	40

Tablo 4.2'de tez kapsamında toz metalurjisi yöntemi ile üretilen şekil bellekli Ti-Ni esaslı tüm alaşımların sinterleme işlemi öncesi (ham yoğunluk) ve sinterleme işlemi sonrası ölçülen yoğunluk değerleri görülmektedir.

Tablo 4.2: Alaşımların sinterleme işlemi öncesi ve sonrası yoğunluk değerleri

Alaşım	**Ham numune yoğunluğu (g/cm^3)**	**Sinterlenmiş numune yoğunluğu (g/cm^3)**
Ti-Ni	5.8	5.9
Ti-Ni	5.9	6.0
Ti-Ni-Co	5.9	6.0
Ti-Ni-Co	5.9	6.0
Ti-Ni-Nb	5.8	6.1
Ti-Ni-Cu	5.8	6.0
Ti-Ni-Sn	5.7	5.9
Ti-Ni-Si	5.6	5.8
Ti-Ni-Cr	5.6	5.9
Ti-Ni-Mo	5.8	6.0
Ti-Ni-Al	5.6	5.7
Ti-Ni-Co-Cr-Sn	5.7	5.9

Şekil 4.4'de sinterlenmiş Ti-Ni alaşımı şekil bellekli numunelerde elastisite modülünün sıcaklık ile değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi martenzit faz ile östenit faz arasında meydana gelen faz dönüşüm sıcaklığında fazların elastisite modülleri farklı olduğundan dolayı elastisite modülünde değişim meydana gelmektedir. Genel olarak alaşımların martenzit-östenit faz dönüşüm sıcaklığı yaklaşık olarak 35-40 °C aralığındadır. Sonuç olarak, martenzit faz ile östenit faz arasında meydana gelen faz dönüşüm sıcaklığı ultrasonik hız ölçümü ile tahribatsız olarak belirlenebilir. Genel olarak ultrasonik hız, malzemenin yoğunluğuna ve elastisite modülüne bağlıdır.



Şekil 4.4: Numunelerde elastisite modülünün sıcaklık ile değişimi

Şekil 4.5'de Ti-Ni şekil bellekli alaşımlara sinterleme işlemi sonrası uygulanan yaşlandırma sıcaklığının elastisite modülüne olan etkisi görülmektedir. Görüldüğü gibi yaşlandırma sıcaklığı arttıkça elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Genel olarak, yaşlandırma işlemi esnasında Ti_3Ni_4 çökeltilerinin uyumlu oldukları bilinmektedir. Yaşlandırma işlemi devam ettikçe çökeltiler irileşmekte ve matris yapısı ile uyumsuz hale gelmektedir. Genel olarak, Ti-Ni şekil bellekli alaşımlarında dönüşüm sıcaklığının artan Ni oranı ile önemli oranda ve hızlıca düştüğü bilinmektedir. Diğer yandan, Ti içerisinde Ni çözünürlüğü artan sıcaklık ile artmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda yapılan ısıl işlemler alaşımın Ni oranını düşürmekte ve dönüşüm sıcaklığınını arttırmaktadır.

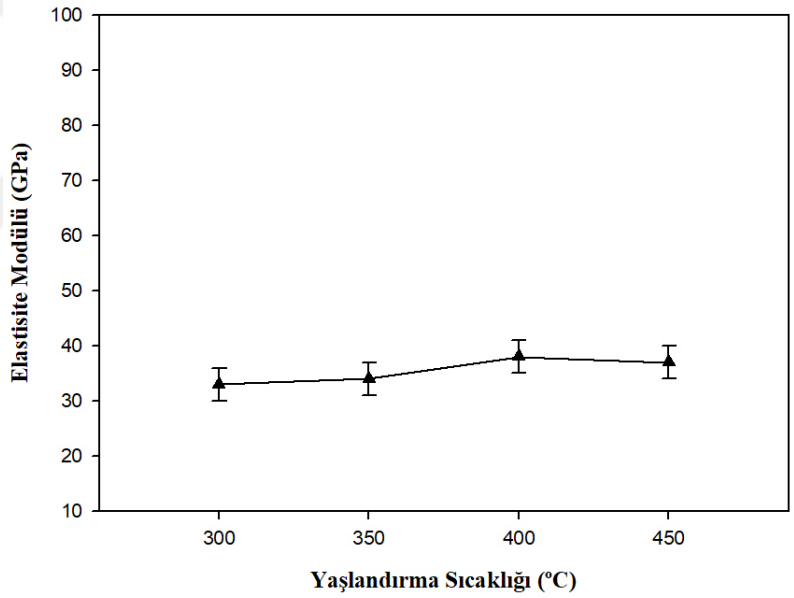
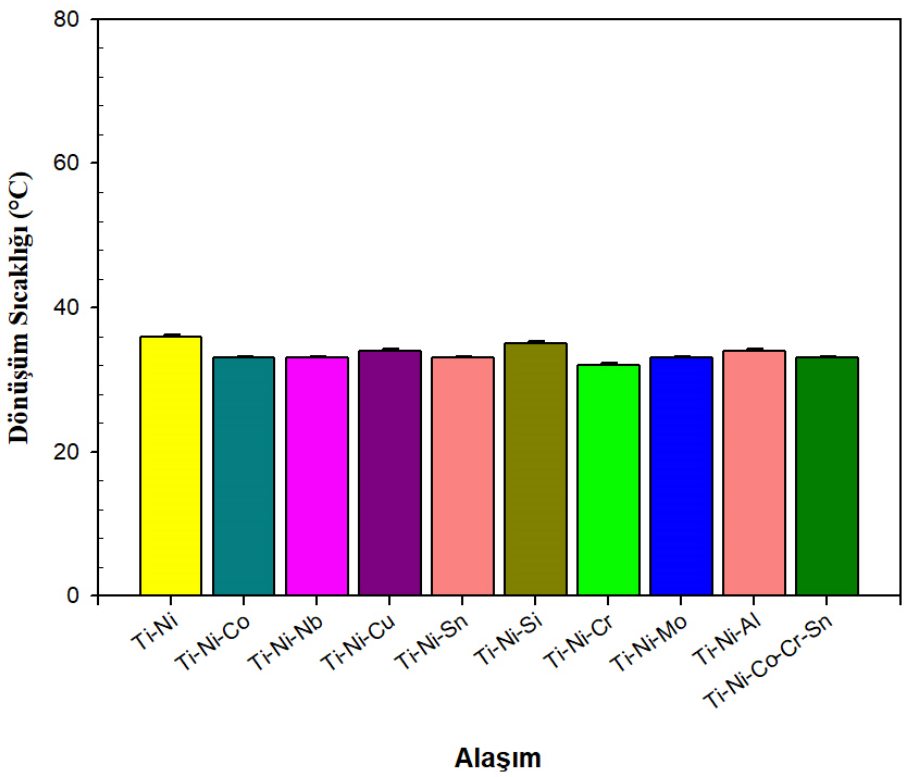


Figure 4.5: Yaşlandırma sıcaklığının elastisite modülüne etkisi

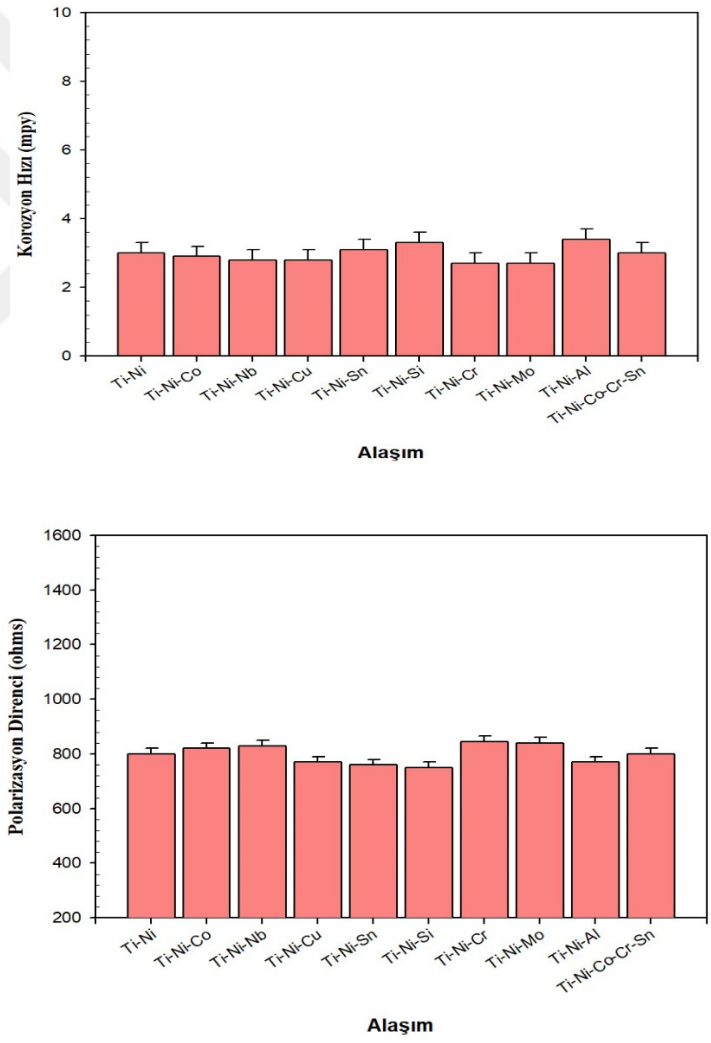
Şekil 4.6'da üretilen şekil bellekli alaşımların martenzit-östenit faz dönüşüm sıcaklıkları görülmektedir. Şekil bellekli alaşımların faz dönüşüm sıcaklıkları ultrasonik test ile hesaplanmıştır. En düşük faz dönüşüm sıcaklığı Ti-Ni-Cr ve Ti-Ni-Co alaşımlarında elde edilmiştir. Genel olarak, Ti-Ni şekil bellekli alaşımlarında dönüşüm sıcaklığının artan Ni oranı ile önemli oranda ve hızlıca düştüğü bilinmektedir. Diğer yandan, Ti içerisinde Ni çözünürlüğü artan sıcaklık ile artmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda yapılan ısıl işlemler alaşımın Ni oranını düşürmekte ve dönüşüm sıcaklığınını arttırmaktadır.



Şekil 4.6: Alaşımların dönüşüm sıcaklığı değerleri

4.3. ELEKTROKİMYASAL KOROZYON ÖZELLİKLERİ

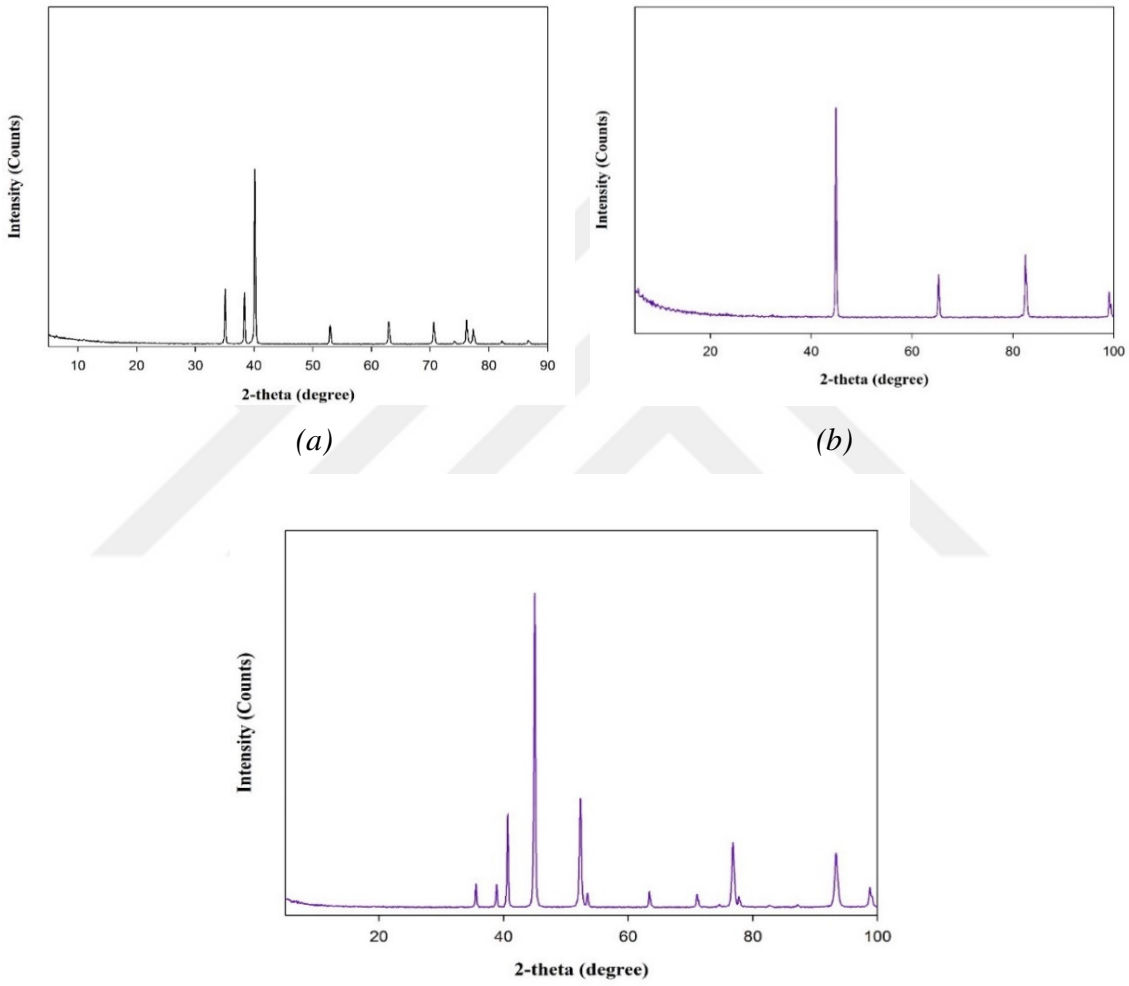
Şekil 4.7'de üretilen alaşımların NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon testleri sonucu bulunan korozyon hızı ve polarizasyon direnci değerleri toplu olarak görülmektedir. Görüldüğü gibi en düşük korozyon hızı ve en yüksek polarizasyon direnci değerleri Ti-Ni-Cr ve Ti-Ni-Mo alaşımlarında görülmüştür. En yüksek korozyon hızı ve en düşük polarizasyon direnci değerleri ise Ti-Ni-Si ve Ti-Ni-Al alaşımlarında görülmüştür.



Şekil 4.7: Alaşımlarının a) korozyon hızı ve b) polarizasyon direnci sonuçları

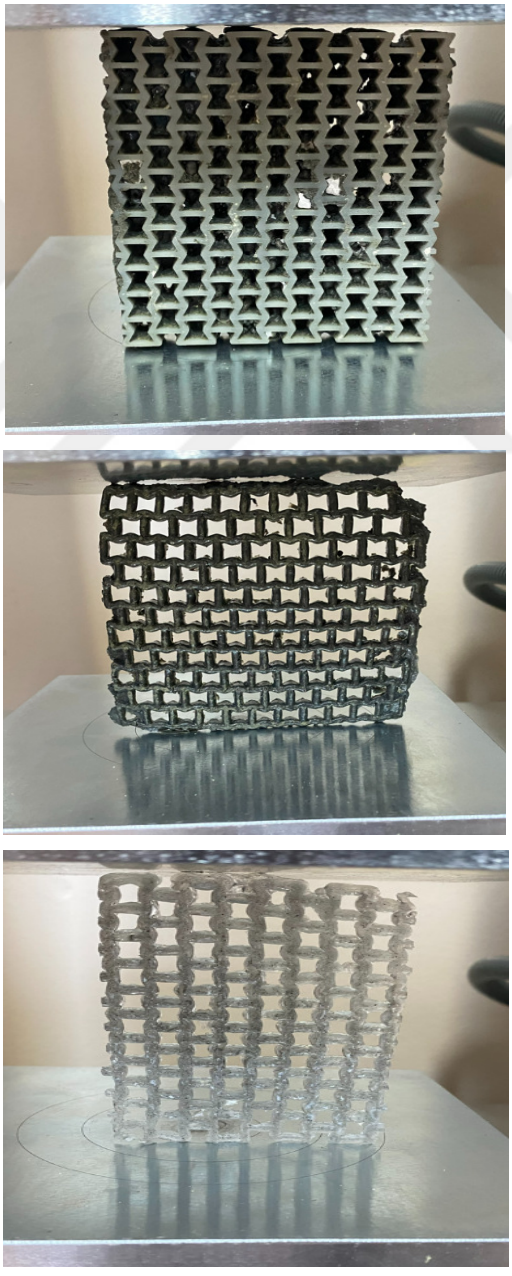
X-Işını Difraksiyon Analizi

Aşağıdaki Şekil 4.8'de Ti tozu, Ni tozu ve sinterlenmiş şekil bellekli titanyum-nikel (Ti-Ni) alaşımının XRD grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.8: XRD sonuçları a) Ti, b) Ni, c) Ti-Ni

Aşağıdaki Şekil 4.9'da replika yöntemi ile üretilmiş mekanik metamalzeme (auxetik) re-entrant bir geometriye sahip şekil bellekli Ti-Ni tozu ile takviye edilmiş epoksi matrisli kompozit malzeme yapısı görülmektedir. Metamalzeme geometrisinin sandviç yapılarda kullanılma potansiyeli olduğu söylenebilir. Ayrıca, Ni-Ti tozu ilavesinin martenzit-östenit faz dönüşümü esnasında çatlakların enerjisini absorblayacağı ve böylece polimer matrisin tokluğunu arttıracağı söylenebilir.



Şekil 4.9: Ti-Ni katkılı epoksi matrisli kompozit malzemeler

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, uçak uygulamaları için şekil bellekli Ni-Ti alaşımı esaslı malzemelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretilmesi ve mikroyapı/mekanik özelliklerinin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Genel olarak şekil bellekli malzemeler, belirli bir plastik deformasyona (şekil değişikliği) uğratıldıktan sonra, uygulanan sıcaklık veya gerilmelere bağlı olarak deformasyon öncesi ilk şeklini hatırlayan ve deformasyon öncesi ilk şekline geri dönebilen mühendislik malzemeleridir. Tez kapsamında, şekil bellekli Ni-Ti esaslı metal alaşımları geleneksel toz metalurjisi (pres-sinter) yöntemi ile üretilmiştir. İlk olarak, Ni-Ti alaşım tozları belirlenen oranlarda tartılmış ve mekanik alaşımlama (bilyeli değirmen) yöntemi ile hazırlanmıştır. Ardından, alaşım toz karışımları tek eksenli preslenerek (toz metalurjisi) ham numuneler üretilmiştir. Daha sonra ham numuneler vakum ortamında 1200 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Sinterlenmiş numunelere şekil bellek eğitimi ısıl işlemleri uygulanmıştır. Ayrıca Ti-Ni alaşımı içerisine ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin çeşitli özelliklere etkileri incelenmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapısı ve mekanik özellikleri tahribatlı (basma) ve tahribatsız (ultrasonik muayene) testlerile incelenmiştir. Tahribatlı ve tahribatsız test sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca üretilen alaşımların elektrokimyasal korozyon davranışları NaCl çözeltisi içerisinde incelenmiştir.

Genel olarak şekil bellekli malzemeler yeni bir mühendislik malzeme türüdür. Şekil hafızalı malzemeler öncelikle östenit faz bölgesinden aniden soğutularak martenzit faz yapısına dönüştürülmekte, daha sonra martenzit faz yapısında deformasyona uğratılmakta (ikinci şekil), daha sonra tekrar ısıtılarak östenit faza dönüşmek suretiyle ilk şekillerine geri dönebilen malzemelerdir.

Şekil bellekli alaşımlara sinterleme işlemi sonrası yaşlandırma işlemi uygulanmış ve elastisite modülüne olan etkisi incelenmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı arttıkça elastisite modülünün arttığı görülmüştür. Genel olarak, yaşlandırma işlemi esnasında Ti_3Ni_4 çökeltilerinin uyumlu oldukları bilinmektedir. Yaşlandırma işlemi devam ettikçe çökeltiler irileşmekte ve matris yapısı ile uyumsuz hale gelmektedir.

Üretilen şekil bellekli alaşımların martenzit-östenit faz dönüşüm sıcaklıkları ultrasonik test ile hesaplanmıştır. En düşük faz dönüşüm sıcaklığı Ti-Ni-Cr ve Ti-Ni-Co alaşımlarında elde edilmiştir.

Şekil bellekli alaşımların elektrokimyasal korozyon testleri NaCl çözeltisinde gerçekleştirilip korozyon hızı ve polarizasyon direnci değerleri belirlenmiştir. En düşük korozyon hızı ve en yüksek polarizasyon direnci değerleri Ti-Ni-Cr ve Ti-Ni-Mo alaşımlarında görülmüştür. En yüksek korozyon hızı ve en düşük polarizasyon direnci değerleri ise Ti-Ni-Si ve Ti-Ni-Al alaşımlarında görülmüştür.

Sonuç olarak, mekanik alaşımlama-toz metalurjisi (pres-sinter) yöntemi ile üretilen Ni-Ti esaslı şekil bellekli alaşımlarının uçak uygulamalarında kullanılma potansiyellerinin olduğu söylenebilir.

Genel olarak nikel (Ni) ve titanyum (Ti) metallerinin erime sıcaklıkları oldukça yüksektir. Ayrıca özellikle titanyum çok aktif bir metaldir. Ti ve Ni elementleri ile Ti-Ni esaslı alaşımların döküm yöntemi ile üretimi oldukça zor ve aynı zamanda enerji sarfiyatından dolayı ekonomik değildir. Bu nedenle Ni-Ti esaslı şekil bellekli alaşımların toz metalurjisi yöntemi ile üretilmesi çok daha avantajlıdır. Ayrıca toz metalurjisi-mekanik alaşımlama yöntemi ile döküm ile mümkün olmayan oranlarda alaşım elementlerinin (özellikle refrakter metaller) ilave edilmesi mümkün olmaktadır.

Gelecek Çalışmalara Yönelik Öneriler;

- Martenzit-östenit dönüşüm sıcaklığının belirlenmesinde iletkenlik ölçümü (girdap akımları yöntemi - eddy current) kullanılabilir.
- Martenzit-östenit dönüşüm sıcaklığının belirlenmesinde tüm alaşım gruplarında ve tüm numunelerde DSC testlerinin yapılması ve ultrasonik sonuçlar ile de karşılaştırılması faydalı olabilir.
- Fe esaslı ve Cu esaslı gibi şekil bellekli alaşımların üretilerek Ni-Ti esaslı şekil bellekli alaşımlar ile özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları (uçak motoru) açısından kıyaslaması yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Onursal M. 2010, *Uçaklarda Kullanılan Metal Malzemelere Uygulanan Tahribatsız Muayenele*r. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.

[2] Arun D.I. Chakravarthy P. Arockia Kumar R. Santhosh B. 2018. Shape Memory Materials. CRC Press.

[3] Kundu A.K., 2010, *Aircraft Design*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

[4] Özkan A. 2015, *Ticari Uçak Motor Muhafaza Elemanında Kullanılan Kompozit Malzemenin Mukavemetinin İncelenmesi*. Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.

[5] Ercan H. 2006, *Uçak Sanayiinde Kullanılan balpeteği Kompozitlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi.

[6] https://mae.ufl.edu (son ziyaret 18.07.2021)

[7] https://www.prescouter.com/2020/06/jet-engines-high-temperature-materials (son ziyaret 18.07.2021)

[8] https://tr.m.wikipedia.org/wiki/Dosya:Turbofan_operation.svg (son ziyaret 18.07.2021)

[9] Beuer U.P. 2016, *Commercial Aircraft Composite technology*, Cambridge University Press, Springer, Switzerland.

[10] Şengör, İ., 2013, Shape memory polymer composites containing carbon based fillers, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği.

[11] Yu X., Zhou J., Liang H., Jiang Z., Wu L., 2018, Progress in Materials Science 94, 114-173.

[12] Ren X., Das R., Tran P., Ngo T.G., Xie Y.M., 2018, Smart Mater. Struct. 27, 114-173.

[13] Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A., 2014, Materials and Design. 56, 1078-113.

[14] Ma J., Karaman I., Noebe R.D., 2010, Materials and Design. 55, 257-315.

[15] Leng J., Lan X., Liu Y., Du S., 2011, Materials and Design. 56, 1077-1135.

[16] Yang Y., Urban M.W.., 2013, Chem Soc. Rev. 42, 7446.

[17] Ak, E., 2010, Stress and Deformation Analysis in Stents, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği.

[18] Dilibal, S., 2015, Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşım Üretimi ve Şekil bellek Eğitimi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[19] Elzey, D.M., Sofla A., Wadley, H., 2013, Smart Structure and Materials: Active Materials, VA USA, 92-99.

[20] Kumar, P.K., Lagoudas, D.C.,2008, Introduction to Shape Memory Alloys, Springer, USA.

[21] https://www.nasa.gov/centers/armstrong/feature/nasa-tests-new-alloy-to-fold-wings-in-flight.html (son ziyaret 18.07.2021)

[22] Jabur A.S.., Al-Haidary J.T.., Al-Hasani E.S., 2013, Journal of Alloys and Compounds, 578, 136-142.

[23] Eda T., Khantachawana A., Umeda J., Kondoh K., 2019, Materials Transactions, 60, 8, 1583-1590.

[24] Yaşar F., 2006. Thermomechanical Characterization of Ti-rich TiNi Shape Memory Alloys, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi.

[25] Aydoğmuş T., 2010. Processing andl Characterization of Porous Titanium-Nickel Shape Memory Alloys, Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi.

[26] Z.G. Wang, X.T. Zu, J.Y. Dai, P. Fu, X.D. Feng. Materials Letters 57 (2003) 1501-1507

[27] Aköz S., 2015. Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşımının Toz Enjeksiyon Kalıplama ile Üretimi ve Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

[28] Tanış N.A., 2015. Bakır ve Titanyum İlaveli Ni-Ti Şekil Bellekli Alaşımının Toz Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilebilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.

[29] N. El-Bagoury. Met. Mater. Int., Vol. 22, No. 3 (2016), pp. 468~473

[30] A.W. Young, T. Torgerson. N.A. Ley. K. Gomez. O. Benafan. M.L. Young. Shap. Mem. Superelasticity (2019) 5:125-135

[31] J.H. Sui, Z.Y. Gao, Y.F. Li, Z.G. Zhang, W. Cai. Materials Sci and Engineering A 508 (2009) 33-36

[32] B. Young, B. Haghgouyan, D.C. Lagoudas, I. Karaman. Shape Memory and Superelasticity, 2019.

[33] P. Salvetr, A. Skolakovs, P. Novak. Kovove Mater. 55 2017 379-383