# MÜHENDİSLİK, MİMARLIK, TASARIMDA

## TEORİ, UYGULAMA VE ARAŞTIRMALAR




**EDİTÖRLER**
**Prof. Dr. Ali Riza MOTORCU, Prof. Dr. Ashok JAMMI,**
**Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA**

# MÜHENDİSLİK, MİMARLIK TASARIMDA TEORİ
# UYGULAMA VE ARAŞTIRMALAR

EDİTÖRLER
Prof. Dr. Ali Rıza MOTORCU
Prof. Dr. Ashok JAMMI
Dr. Öğr. Üyesi Senai YALÇINKAYA

**MÜHENDİSLİK, MİMARLIK, TASARIMDA TEORİ, UYGULAMA VE ARAŞTIRMALAR**

**EDİTÖRLER**
**Prof. Dr. Ali Rıza MOTORCU**
**Prof. Dr. Ashok JAMMI**
**Dr. Öğr. Üye. Senai YALÇINKAYA**

**Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: 14/2022**
**20 ARALIK 2022**

**Yayıncı Sertifika No: 52866**
**E-ISBN: 978-625-7367-39-4**
**Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları**

Bu bilimsel kitabının her türlü yayın hakkı GÜVEN PLUS GRUP DANIŞMANLIK A.Ş. YAYINLARI'na aittir. Yayınevinin yazılı izni olmadan, bilimsel/akademik kitabın tümünün veya bir kısmının elektronik, mekanik ya da fotokopi yoluyla basımı, yayını, çoğaltımı ve dağıtımı yapılamaz. ***Kitapta yer alan her bölüm ve makalenin sorumluluğu, görseller, grafikler, direkt alıntılar ve etik kurul ve kurum iznine yönelik sorumluluk ilgili yazarlara aittir. Bu yönde Oluşabilecek Herhangi Hukuki bir olumsuzlukta Yayınevi başta olmak üzere kitabın hazırlanmasına destek sağlayan kurumlar, kitabın düzenlenmesi ve tasarımından sorumlular kurum(lar) ve kitap editörleri, hakemler, düzenleme kurulu, bilim kurulu ve diğer kurullar ile yayınevi hiçbir konuda "maddi ve manevi" bir yükümlülük ve hukuki sorumluluğu kabul etmez ve etmesi istenemez; hukuki yükümlülük altına alınamaz. Her türlü hukuki yükümlülük ve sorumluluk "maddi ve manevi" yönden ilgili bölüm yazar(lar)ına aittir. Bu yöndeki haklarımızı maddi ve manevi yönden GÜVEN PULUS GRUP DANIŞMANLIK "YAYINCILIK"A.Ş. olarak ve kitap bilim/editörler kurulları adına saklı tutarız. Herhangi bir hukuki sorunda/durumda İSTANBUL mahkemeleri yetkilidir.*** Güven Plus Grup Danışmanlık bünyesinde hazırlanan ve yayınlan bu eser ISO: 10002:2014-14001:2004-9001:2008-18001:2007 belgelerine sahiptir. Bu eser TPE "Türk Patent Enstitüsü" tarafından "Güven Plus Grup A.Ş.2016/73232" ve "2015/03940" nolu tescil numarası ile markalı bir eserdir. Bu bilimsel/akademik kitap ulusal ve uluslararası nitelikte olup, İstanbul Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü İstanbul Basma Yazı ve Resimleri Derleme Müdürlüğünün Sayı: 37666426-207.01[207.02.02]-E.62175 Tarih: 21.01.2019 bilgileri ile resmi olarak belgelendirilmiştir. ***"2019 yılı akademik teşvik kriterleri kapsamında olup, 17/01/2020 tarihli ve 31011 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan 16/1/2020 tarihli ve 2043 sayılı Cumhurbaşkanı Kararı Uyarınca ilgili yayınlanan yönetmelik kapsamında değerlendirilmekte"*** olup, akademik teşvik kriterlerini karşılamaktadır. Çok bölümlü ve yazarlı olan bu bilimsel kitabı E-ISBN'li olup Kültür Bakanlığı Milli Kütüphaneler tarafından ve 18 Farklı Dünya Ülkesiyle Anlaşmalı olan Milli Kütüphanenin E Erişim sistemi tarafından da taranmaktadır. Bu kitap maddi bir değer ile alınıp satılamaz. Kitap yer alan bölüm, makalelerden alıntı yapmak ve ilgili bölüm ile makaleye atıf yapılmak koşulu ile kaynak gösterilmek üzere bilimsel ya da ilgili araştırmacılar tarafından kullanılabilir. ***Yayın evimiz ve kitap editörler kurulu kişisel verilerin korunması ve özel hayatın gizliliği kanunlarına uygun hareket eder. Bilimsel kitap bölüm yazarlarının da bu yönde hareket etmesini zorunlu kılar. Kişisel verilerin korunmasına ilişkin olarak işbu akademik/bilimsel kitabına sahip olan bireylerin ilgili kanun, yönetmelik ve uygulamalara göre hareket etmesi bir zorunluluktur. Bunun aksi hareket edenler hakkında oluşan hukuki, maddi ve manevi sorun ile zorunlulukları peşinen kabul etmiş sayılır.***

**Metin ve Dil Editörleri**
Doç. Dr. Gökşen ARAS (Türkçe – İngilizce)
Dr. Öğr. Üye. L. Santhosh KUMAR (İngilizce)

**Kapak ve Grafik Tasarım**
Öğr. Gör. Ozan KARABAŞ
Ozan DÜZ

**Sayfa Düzeni**
Burhan MADEN

**Baskı-Cilt**
GÜVEN PLUS GRUP DANIŞMANLIK A.Ş. YAYINLARI®
Kayaşehir Mah. Başakşehir Emlak Konutları, Evliya Çelebi Cad. 1/A D Blok K4 D29 Başakşehir İstanbul Tel: +902128014061- 62 Fax:+902128014063 Mobile:+9053331447861

**KİTAP İMTİYAZ SAHİBİ**
**GÜVEN PLUS GRUP DANIŞMANLIK A.Ş. YAYINLARI®**
Kayaşehir Mah. Başakşehir Emlak Konutları, Evliya Çelebi Cad. 1/A D Blok K4 D29 Başakşehir İstanbul Tel: +902128014061-62-63 - +905331447861 info@guvenplus.com.tr, www.guvenplus.com.tr

# İÇİNDEKİLER

**ÖNSÖZ ..... 4**

**KENTSEL SOSYAL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞİN SAĞLANMASINDA KAMUSAL MEKÂN TEMELLİ BİR YAKLAŞIM ..... 6**
*Şeyda AKÇALI, Arzu ISPALAR ÇAHANTİMUR*

**BURSA HANLARINDA MEKÂNSAL TERCİHLER, MEKÂN DİZİMİ VE İŞLEV ÜZERİNE BİR KARŞILAŞTIRMA ..... 35**
*Kemal Furkan ULUSOY, Süheyla BÜYÜKŞAHİN*

**TEMEL TASARIM KAVRAMININ İÇ MİMARLIK VE RESİM BRANŞLARI ÖZELİNDE DİSİPLİNLERARASI DEĞERLENDİRİLMESİ..... 53**
*Damla ÇAĞAL TAŞDELEN*

**ANTAKYA MÜZE OTELİ'NİN YAPIM TEKNİĞİ AÇISINDAN İNCELENMESİ..... 84**
*Ayşenur KARA, Ufuk Fatih KÜÇÜKALİ*

**ANTİBİYOTİK KİRLİLİĞİ VE SULARDAN ANTİBİYOTİK GİDERİMİ..... 111**
*Belgin KARABACAKOĞLU*

**İSTANBUL TRAFİĞİ TESPİTLERİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ..... 139**
*Mustafa ILICALI, Mahmut Esad ERGİN, Muhammed Melikşah ÇAKALOĞLU*

**ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ VE ŞEKİL HAFIZA EĞİTİM SÜREÇLERİ..... 155**
*Sedat GÜVEN, Hasan GÖKKAYA, Ali Rıza MOTORCU, Gökhan SUR*

**SİSTEM TEMELLİ KAZA ANALİZ VE RİSK DEĞERLENDİRME METODU: FRAM..... 180**
*Bilal MURAT, Ali Riza MOTORCU*

**MODERN İMALAT TEKNİKLERİ VE YAKLAŞIMLARI ..... 196**
*Senai YALÇINKAYA, Alper ÖNER*

# ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ VE ŞEKİL HAFIZA EĞİTİM SÜREÇLERİ

*Sedat GÜVEN[1], Hasan GÖKKAYA[2], Ali Rıza MOTORCU[3], Gökhan SUR[4]*

**Öz:** Gelişen teknoloji ile birlikte otomotiv, elektronik, havacılık, inşaat ve biyomedikal gibi sektörlerde fonksiyonel özelliklere sahip metal alaşımlarına olan talep artmaktadır. Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA), sergiledikleri Süper Elastisite (SE) ve Şekil Hafıza Etkisi (ŞHE) gibi üstün özellikleri ile düşük yoğunluk, yüksek süneklik, mukavemet ve darbe dayanımı, üstün korozyon ve aşınma direnci ile yorulma ömrü gerektiren endüstrideki çeşitli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. ŞHA'ların sergilemiş oldukları ŞHE, çoğu durumda alaşımın ham madde olarak tedarik edildiğinde kazandırılmış bir özelliği olmayıp çeşitli ısıl ve mekanik prosedürlerin uygulanması sonucunda elde edilebilmektedir. Eğitim adı verilen bu prosedürler gerçekleştirilerek ŞHA'lara tek ve çift yönlü olarak iki çeşit ŞHE kazandırılabilmektedir. ŞHA'lara uygulanan deformasyonlar sonrası alaşımın deforme olmamış şeklinin ısıtma yoluyla hatırlanması tek yönlü ŞHE, deforme olmuş ve olmamış şekillerin sırasıyla ısıtma ve soğutma yoluyla hatırlaması ise çift yönlü ŞHE olarak tanımlanabilmektedir. Tek ve çift yönlü ŞHE; sıcaklık, gerilme ve termomekanik işlemler ile ŞHA'ların eğitilmesi sonucunda gözlemlenebilen özelliklerdir. ŞHA'ların orijinal şeklini geri kazanması ve eğitilmesi, martenzit ve östenit fazlar arasında difüzyonsuz gerçekleşen kristalografik katı faz dönüşümlerinin (termoelastik martenzitik dönüşüm) bir sonu-

1 Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gaziantep / Türkiye, e-mail: sedat.guven@gibtu.edu.tr, Orcid No: 0000-0001-8891-5421

2 Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük / Türkiye, e-mail: hgokkaya@karabuk.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-7103-0616

3 Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale / Türkiye, e-mail: armotorcu@comu.edu.tr, Orcid No: 0000-0002-9129-8935

4 Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük / Türkiye, e-mail: gokhansur@karabuk.edu.tr, Orcid No: 0000-0003-4908-3372

cu olarak ortaya çıkmaktadır. Termoelastik martenzitik dönüşümler, östenit ve martenzit fazı arasındaki bir arayüz ile ilişkilidir. Ayrıca, ŞHA'ların bir diğer özelliği olan SE, ŞHE'den farklı olarak herhangi bir ısıl dönüşüme ihtiyaç duymaksızın östenit bitiş sıcaklığı ($A_f$) ve SE gözlemlenebilecek en yüksek sıcaklık ($M_d$) aralığında uygulanan mekanik yüklemelerin ortadan kaldırılmasıyla orijinal şeklin geri kazanılabildiği bir fonksiyondur. ŞHA'ların sergilediği ŞHE ve SE gibi üstün özellikler doğrudan martenzitik dönüşümle ilgilidir. Martenzitik dönüşüm, martenzit ve östenit faz yapıları arasında dış gerilmeler ve/veya sıcaklığın etkisiyle difüzyonsuz katı-katı faz dönüşümleri olarak bilinmektedir. Metalin bileşimine bağlı olarak martenzit ve östenit fazların başlangıç ve bitiş sıcaklıkları değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmada, ŞHA'ların martenzitik dönüşüm kavramına açıklık getirilerek ŞHE ve SE özelliklerin hangi şartlar altında gerçekleşebildiği tartışılmıştır. Ayrıca, tek ve çift yönlü ŞHE ile SE kavramları incelenmiştir. Son olarak, ŞHA'lara çift yönlü ŞHE özelliği kazandırmak için geliştirilen eğitim süreçlerinin detayları (uygulanış biçimleri, üstünlükleri ve sınırlamaları) aktarılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalar, optimum eğitim sürecinin termomekanik döngü süreci sonrası elde edildiği ve diğer süreçlerle mukayese edildiğinde daha üstün ŞHE kazandırılabildiği sonucunu ortaya çıkarmıştır. Termomekanik döngünün martenzitik dönüşüm üzerinde önemli değişimlere sebebiyet verdiği belirlenmiştir.

***Anahtar Kelimeler:*** Şekil Hafızalı Alaşımlar, Martenzitik Dönüşüm, Şekil Hafıza Etkisi, Süper Elastikiyet, Eğitim Süreçleri

## GİRİŞ

Şekil Hafızalı Alaşımların (ŞHA) dikkate değer ilk özellikleri, Arne Ölander tarafından 1932 yılında Altın-Kadmiyum (AuCd) üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada keşfedilmiştir (Gaikwad vd., 2016). Sonraki yıllarda (1938) benzer özelliklerin pirinç (CuZn) malzemede var olduğu ve martenzitik faz yapısının alaşım sıcaklığındaki değişikliklerle ortaya çıkabildiği Greninger ve Mooradian tarafından saptanmıştır (Gürlük, 2009). Chang ve Read, 1951 yılında ilk olarak martenzitik dönüşüm ile şekil hafıza arasındaki ilişkiyi bildirmiştir (Urbina Pons, 2011). Buehler ve arkadaşları ise günümüzde ticari olarak en yaygın kullanım alanına sahip, Şekil Hafıza Etkisi (ŞHE) sergileyen eş atomlu Nikel-Titanyum (NiTi) alaşımların keşfedilmesini sağlamışlardır (Dağ, 2019). Bugüne

kadar, yaklaşık 30 alaşımın ŞHE sergilediği gözlemlenmiştir (Janke vd., 2005). Bununla birlikte, nispeten düşük sıcaklıklarda plastik olarak deforme olduğunda ŞHE özelliği sergileyen ve belirli bir sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra orijinal şekline geri dönebilen Bakır-Çinko-Alüminyum (CuZnAl), Bakır-Alüminyum-Nikel (CuAlNi) ve NiTi ŞHA'lar ticari kullanım alanları ile diğer alaşımlara kıyasla ön plana çıkmaktadır (Traleski vd., 2012).

ŞHA'larda ŞHE, çoğunlukla kübik B2 östenit ve monoklinik B19' martenzit fazları arasındaki katı-katı difüzyonsuz termoelastik martenzitik dönüşümden kaynaklanmaktadır (Oudich ve Thiebaud, 2016). Çoğu durumda, ŞHA'lar ham madde olarak, yani şekil hafızasız olarak tedarik edilmektedir. Tek Yönlü Şekil Hafıza Etkisi (TYŞHE) ve Çift Yönlü Şekil Hafıza Etkisi (ÇYŞHE) olmak üzere ŞHA'larda iki farklı ŞHE vardır. TYŞHE, deformasyon sonrası malzemenin deforme olmamış şeklinin ısıtma yoluyla hatırlanmasını ifade ederken, ÇYŞHE, hem deforme olmuş hem de deforme olmamış şekillerin sırasıyla ısıtma ve soğutma yoluyla hatırlamasına denir (Taştan, 2022).

Belirli bir şekli ezberlemek için ŞHA'nın istenen şekle sabitlenmesi ve ardından belirli bir süre yüksek sıcaklıkta yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulması gerekmektedir (Huang ve Toh, 2000). Bu durumda, ŞHA'lar TYŞHE özelliklerini kazanmış olmaktadır (Dilibal, 2005). TYŞHE kazandırılmış ŞHA'larda ÇYŞHE oluşturma süreci uygun ısıl işlemlerin uygulanması ile başlamaktadır (Huang ve Toh, 2000). Sıcaklık, gerilme veya her ikisinin birlikte uygulandığı termomekanik işlemler ile ŞHA'lara ÇYŞHE kazandırılabilmektedir (Hayrettin vd., 2019).

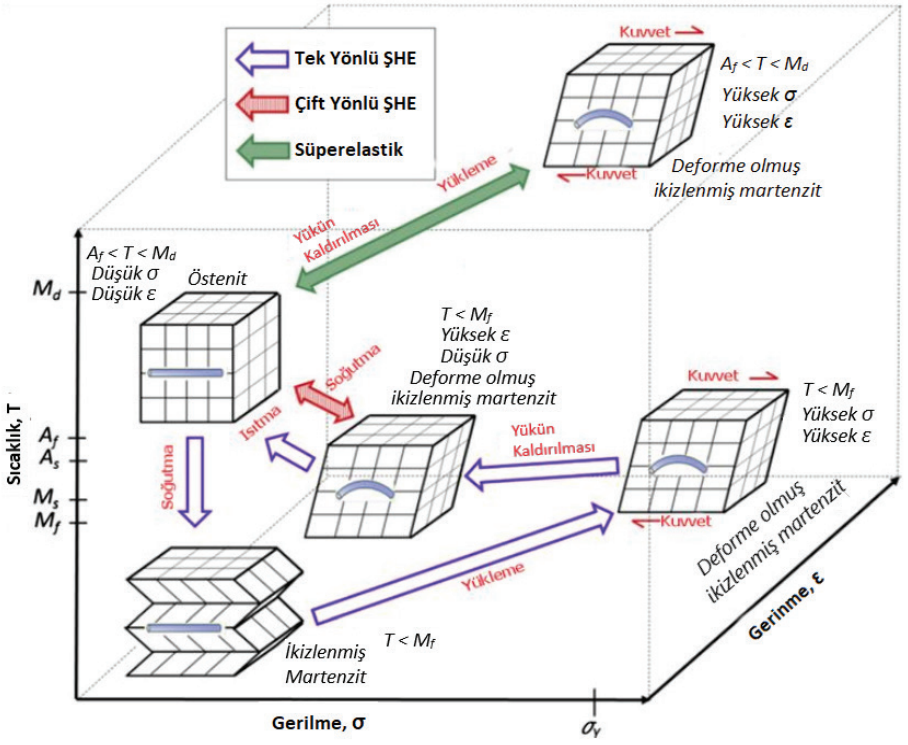
ŞHE özelliklerinin yanı sıra ŞHA'lar, standart metal ve alaşımlardan farklı olarak Süper Elastisite (SE) özelliğine sahiptir (Güven vd., 2022a). Miyazaki ve arkadaşlarının 1981 yılında NiTi ŞHA'lar üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarında, Ni bakımından zengin NiTi alaşımların yaşlandırma ısıl işlemi sonrasında elde edilen ince $Ni_4Ti_3$ çökeltilerinden kaynaklı SE davranış sergilediği tespit edilmiştir (Miyazaki vd., 1981). SE özelliğe sahip ŞHA'lar, TYŞHE ve ÇYŞHE'den farklı olarak deformasyona uğramaları sonrasında orijinal şekillerini kazanabilmek için martenzit fazı kapsayan geçişlere ihtiyaç duymamaktadır (Güven, 2020). Bu yönleriyle SE özellik sergileyen ŞHA'lar, üstün dönüşüm dav-

ranışları ile deformasyon öncesi şekil veya boyutlarına büyük oranda geri dönüş gerektiren uygulamalara örnek malzemelerdir (Güven vd., 2022b).

Bu çalışmada ŞHA'ların makroskobik davranışları üzerine teknik bilgilerin sunulması amaçlanmıştır. Martenzitik davranış, SE ve ŞHE gibi ŞHA'ları doğrudan ilgilendiren konulara değinilmiştir. ŞHA'larda TYŞHE ve ÇYŞHE elde etmek için gerçekleştirilen eğitim süreçlerinin detaylarının aktarılması amaçlanmıştır.

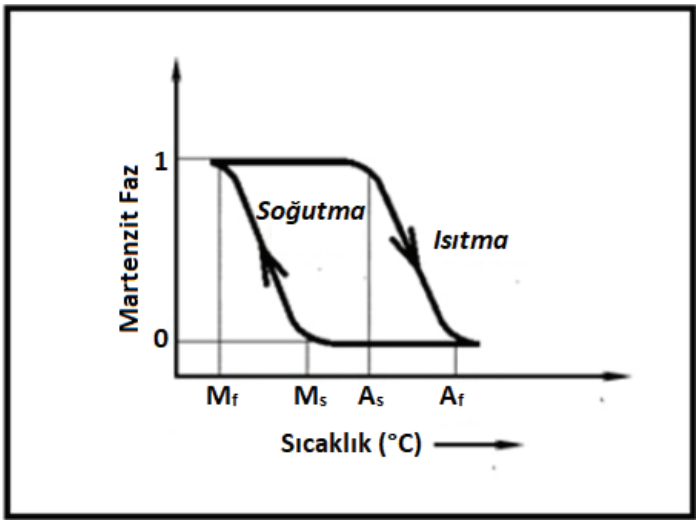
## ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN FONKSİYONEL ÖZELLİKLERİ

ŞHA'ların temel özgün özellikleri, yüksek seviyede gerçekleşen deformasyonlar dahil olmak üzere deformasyon sonrası dışarıdan herhangi bir müdahale olmaksızın, oluşan deformasyonu geri kazanabilmesi (SE) ve benzer şekilde yüksek deformasyon sonrası östenit bitiş sıcaklığının ($A_f$) üzerindeki bir sıcaklık değerine ısıtılarak eski şeklini geri kazanabilmesi (ŞHE) olarak ifade edilebilmektedir (Otsuka ve Wayman, 1998). ŞHA'larda gerçekleşen martenzit ve östenit faz dönüşümlerini, termodinamik prensipler ve kristalografi ile açıklamak mümkündür (Emre ve Oktay, 2018). Bu dönüşümler, üç farklı kristal yapı (ikizlenmiş martenzit bölgesi, deforme olmuş ikizlenmiş martenzit bölgesi ve östenit) ve iki farklı fazda (martenzit ve östenit) gerçekleşmektedir (Şekil 1).




**Şekil 1. ŞHA'larda fazlar, dönüşümler ve kristal yapılar (Jani vd., 2014)**

Östenit yapı yüksek sıcaklıkta, martenzit yapı ise düşük sıcaklıklarda kararlıdır. Bir ŞHA ısıtıldığında martenzitten östenit fazına dönüşmeye başlar. Martenzit fazının başladığı sıcaklıkların gösterimi ($M_s$), martenzit fazın bitişi ($M_f$), östenit faz başlangıcı ($A_s$) ve östenit fazın bitişi ($A_f$) Şekil 2'de gösterilmiştir (Taha vd., 2015).

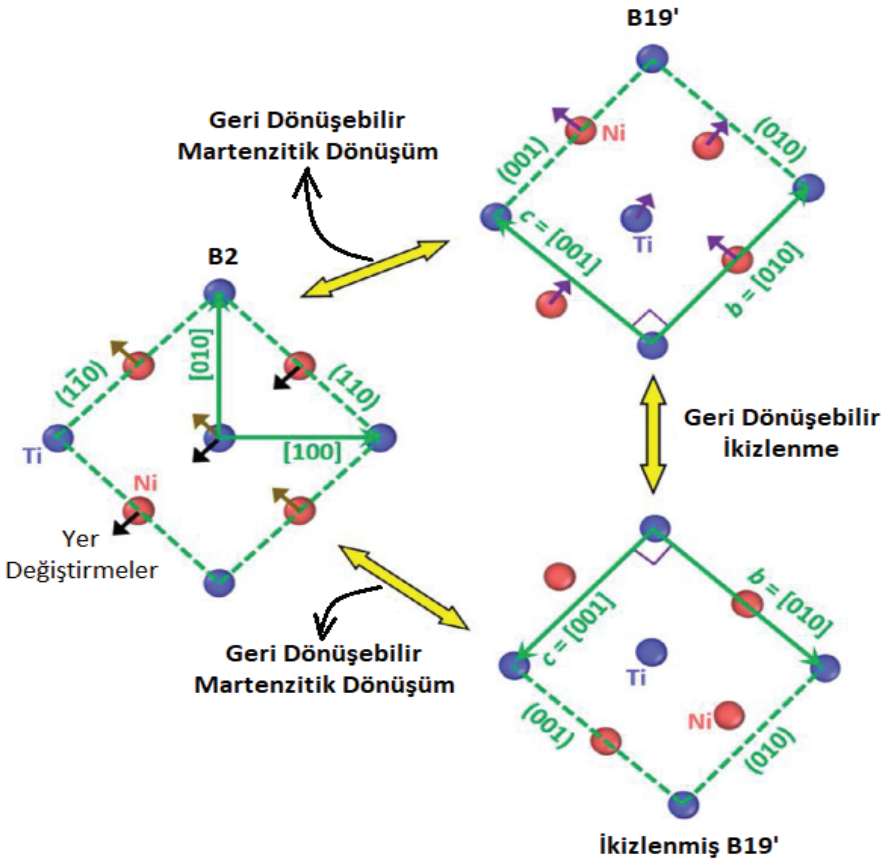



**Şekil 2. ŞHA malzemelerde dönüşüm histerezis eğrisi ve sıcaklığı (Taha vd., 2015)**

**Martenzitik Dönüşüm**

Martenzitik dönüşüm, martenzit ve östenit faz yapıları arasında dış gerilmeler ve/veya sıcaklığın etkisiyle difüzyonsuz katı-katı faz dönüşümleri olarak bilinmektedir (Kaya vd., 2016). Martenzit ise martenzitik dönüşüme uğrayan bir ana fazdan elde edilen faza verilen addır (Van der Wijst, 1992). Düşük sıcaklıktaki martenzitin yapısı, bileşime ve ısıl işlem geçmişine bağlı olarak ortorombik veya monoklinik birim hücrelerle indekslenebilir (Pang vd., 2019). Martenzitik dönüşüm, $M_s$ sıcaklığında oluşmaya başlar ve malzeme $M_f$ sıcaklığına ulaştığında ek dönüşüm tamamlanır. $M_s$ ve $M_f$ sıcaklıkları metalin bileşimine bağlıdır. Dönüşümün gerçekleştiği sıcaklıklar yaşlandırma ısıl işlemi gibi prosedürler yerine getirilerek belirli seviyede ayarlanabilir olmaktadır. Martenzitik dönüşümler birçok metalik ve metalik olmayan kristal, mineral ve bileşik türünde gözlenir (Yaşar, 2006). ŞHA'larda gözlemlenen ŞHE ve SE gibi fonksiyonel özelliklerin tümü B2 östenit fazı ile B19′ martenzit fazı arasındaki martenzitik dönüşümle ilgilidir (Yang vd., 2019). Martenzitik dönüşümler sonucu ŞHA'larda gerçekleşen deformasyonlar, atomların hareketleri neticesinde ikizlenme ile gerçekleşmektedir.

B2 östenitin B19′ martenzite nasıl dönüştüğü ve martenzitik dönüşüm sırasında ikizlenmenin nasıl oluştuğu atomistik simülasyonlar yardımıyla araştırılmıştır (Li vd., 2020). Martenzit tanelerinin östenit içinde çekirdeklendiğinde, kristal yapının doğal bir sonucu olarak bir ikiz ilişkisi oluşturdukları gözlemlenmektedir (Şekil 3). Martenzitik dönüşüm ve ikizlenmede kafes dönüşümü için gerekli olan tek şey atomik karıştırmalardır ve ikizlenme düzlemi kafes dönüşümü sırasında sabit tutulamadığı için ikizlenme düzleminde hiçbir homojen kayma oluşmaz. Bu durumda, ikizlenme mekanizması dislokasyonlar içermez ve termoelastik martenzitik dönüşümü sağlamak mümkündür.

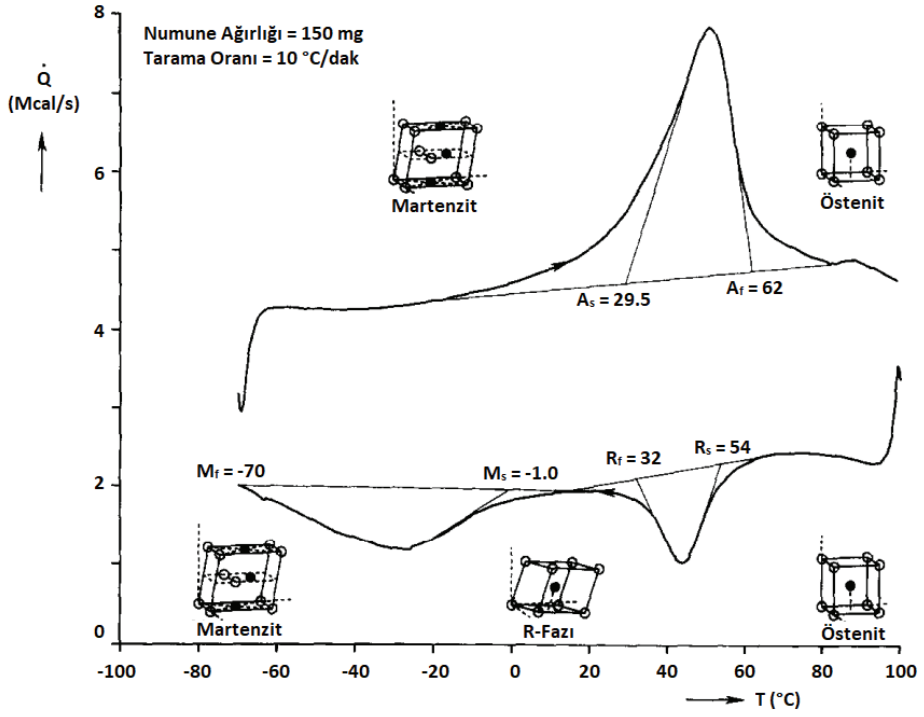



**Şekil 3. B2, B19′ ve ikizlenmiş B19′ arasındaki kafes dönüşümleri (Li vd., 2020)**

Dönüşümün termoelastikliği, malzemenin farklı fazların kristalografik yeniden düzenlenmesi sırasında hacim değişikliğinin neden olduğu gerilmeleri elastik olarak barındırma yeteneğinden kaynaklanır. Genel bir kural olarak, termoelastik martenzitik dönüşüm sırasında hacim etkisi çok küçüktür (< %1), bu da dönüşüm sırasında östenit/martenzit arayüzlerin tutarlılığının korunmasına olanak tanımaktadır (Shuitcev vd., 2020).

ŞHA'larda termoelastik martenzitik dönüşümün kinetik parametreleri farklı kinetik modeller tarafından takip edilebilmektedir. Martenzitik dönüşümün eş süreli araştırmaları için yaygın modeller FlynnWall-Ozawa ve Kissinger modelleridir. Kissinger yaklaşımı, ısıtma/soğutma hızının reaksiyon üzerindeki etkisi sonucu dönüşüm için gerekli olan belirli bir aktivasyon enerjisi ve termal aktivasyonu belirler. Ozawa yaklaşımı ise reaksiyon sırasının ısıtma/soğutma hızından etkilenmeyeceği varsayımı dışında Kissinger yaklaşımına çok benzemektedir (Grgurić vd., 2018).

Termoelastik martenzitik dönüşümleri uyarlamak amacıyla ŞHA'larda nano ölçekli çökeltiler kullanılmaktadır. Bu çökeltiler, ana fazda konsantrasyon heterojenliği, tutarlı gerilme alanı ve geometrik sınırlama ortaya çıkartarak termoelastik martenzitik dönüşüm özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Ni açısından zengin NiTi ŞHA'larda, $Ni_4Ti_3$ çökeltilerinin varlığı, martenzitik dönüşümün türü ve martenzitik dönüşüm başlangıç sıcaklığı başta olmak üzere martenzitik dönüşümlerin özelliklerini ayarlamak için basit ve düşük maliyetli bir oluşumdur. $Ni_4Ti_3$ çökeltilerin varlığı, dönüşüm yolunu normalde tek aşamalı olan B2→B19 martenzitik dönüşümden iki aşamalı B2→R→B19 martenzitik dönüşüme değiştirerek NiTi ŞHA'ların özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Martenzit ve östenit fazları, ŞHA'ların sergilediği üstün davranıştan sorumlu birincil fazlardır; ancak çökelti gibi oluşumlar R ara fazının varlığına sebebiyet verebilmektedir (Şekil 4) (Shaw vd., 1995). Genel olarak $Ni_4Ti_3$ çökeltisi, B2 matrisinde hem Ni konsantrasyon gradyanını hem de iç gerilme alanını tetikleyerek çökeltiler ve B2 matrisi arasındaki arayüzde martenzitik dönüşümü desteklemektedir (Zhu vd., 2021).




**Şekil 4. NiTi ŞHA Termal Analiz Grafiği (Shaw vd., 1995)**

**Şekil Hafıza Etkisi**

1970 yılında Otsuka ve Shimizu, bir CuAlNi alaşımında ŞHE ile termoelastik martenzitik dönüşüm arasında bire bir uyumluluğun var olduğunu gözlemlemişlerdir. Böylece, ŞHE'nin termoelastik martenzitik dönüşümler sergileyen alaşımların özelliği olduğu sonucuna varmışlardır. Kökeni, termoelastik dönüşümün kristalografik tersinirliğine ve termoelastik alaşımlarda geri kazanılabilir bir deformasyon modunun, yani ikizlenmenin varlığına bağlamışlardır (Tadaki vd., 1988). ŞHE sağlanabilmesi için gerekli kriter, termoelastik martenzitik dönüşümün meydana gelmesidir (Asanovic vd., 2004).

Alaşımların katılaşma sıcaklıkları farklılık gösterdiğinden martenzitik dönüşüm, belirli bir sıcaklık aralığında tamamlanmaktadır (Akdoğan ve Nurveren, 2003). Çoğunlukla dar bir alanda meydana gelen martenzitik faz dönüşümü histerezis ile bağlantılıdır (Huibin, 1991).

ŞHA'larda sıcaklık martenzitik dönüşüm yoluyla döngüsel bir şekilde değiştirildiğinde bir histerezis döngüsü oluşur (Ortín ve Delaey, 2002). Dönüşüm sıcaklıkları ve histerezis genişlikleri alaşıma bağlıdır. Ayrıca mikro yapıya da bağlıdırlar ve kimyasal bileşimdeki bir değişiklikle değiştirilebilirler (Eggeler vd., 2004). Genel olarak, istenen ŞHE özelliklerini elde etmek için alaşım bileşimini değiştirmek, alaşımların tersinir martenzitik dönüşüm sıcaklıklarını ayarlamak için önemli bir yöntemdir (Yang vd., 2017). Tablo 1'de ŞHE sergileyen alaşımların bir kısmının dönüşüm sıcaklıkları ve diğer özelliklerinin yer aldığı bilgiler paylaşılmıştır. Bu alaşımlar arasında uygulama alanları bakımından en çok tercih edilenler NiTi alaşımları ve bakır esaslı alaşımlardır (Akdoğan ve Nurveren, 2003).

Östenit-martenzit ara fazı, dönüşüm sırasında yüksek tersinirlik sağlamak için tamamen tutarlı olduğundan, bir östenit kristalinin yönü ile komşu martenzit kristali arasında kesin bir ilişki vardır. Ek olarak, martenzitin simetri sırası, bir östenit tanesine karşılık gelen östenitinkinden daha düşük olduğundan, kristalografik olarak eşdeğer olan ancak farklı yönelimlere ve farklı kayma düzlemlerine sahip 24 martenzit varyantı geliştirilebilir. Simetri nedeniyle, bu değişkenler arasındaki ilişkiyi uygun bir şekilde açıklamak için grup teorisi uygulanabilir. Örneğin, grup teorisi ile $DO_3$ östenitten 18R martenzite dönüşümde habit düzlemi (martenzitik dönüşümde martenzit faz ile östenit fazı birbirinden ayıran düzlem) varyantlarının normal yönünün dağılımı ortaya koyulabilmektedir (Sun vd., 2012).

**Tablo 1. ŞHE Sergileyen ŞHA'ların Özellikleri (Akdoğan ve Nurveren, 2003; Sato vd., 2006; Tadaki vd., 1988)**

| Alaşım | Kimyasal Bileşim | Dönüşüm Sıcaklık Aralığı (°C) | Yapısal Değişim | Yaklaşık Dönüşüm Histerezisi (°C) |
|---|---|---|---|---|
| Ag-Cd | 44 – 49 %Cd | -190 ~ -50 | B2 → 2H | 15 |
| Au-Cd | 46.5 – 50 %Cd | 30 ~ 100 | B2 → 2H | 15 |
| Cu-Al-Ni | 14 – 14.5 %Al | -140 ~ 100 | $DO_3$ → 2H | 35 |
| | 3 – 4.5 %Ni | | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Cu-Sn | ~15 %Sn | -120 ~ 30 | $DO_3$ → 2H, 18R | |
| Cu-Zn | 38.5 – 41.5 %Zn | -180 ~ -10 | B2 → M9R | 10 |
| Cu-Zn-X X=Si, Sn, Al, Ga | Az %X | -180 ~ 200 | B2 ($DO_3$) → 9R, M93 (18R, M18R) | 10 |
| In-Tl | 18 – 23 %Tl | 60 ~ 100 | YMK → YMT | 4 |
| Ni-Al | 36 – 38 %Al | -180 ~ 100 | B2 → 3R | 10 |
| Ni-Ti | 49 – 51 %Ni | -50 ~ 110 | B2 → B19 | 30 |
| | | | B2 → R → B19 | |
| Fe-Pt | ~25 %Pt | ~ –130 | $Ll_2$ → HMK | 4 |
| Mn-Cu | 5 – 35 %Cu | -250 ~ 180 | YMK → YMT | 25 |
| Fe-Mn-Si | 32 %Mn, 6 %Si | -200 ~ 150 | YMK → HSP | 100 |

ŞHA'larda ŞHE yeteneği, mekanik olarak uygulanan aşırı yükler sonucunda, yüksek uzama oranlarında, çok fazla termomekanik döngü gerçekleştirildiğinde veya yüksek sıcaklıklara maruziyet sonucunda kaybedilmektedir. Bu durumda kaybedilen ŞHE değil malzemenin orijinal şeklidir. ŞHA'lar çok sayıda martenzitik dönüşüme maruz kaldıklarında sapma her döngüde artış göstererek sonunda ŞHE'nin kaybolmasına neden olmaktadır (Rottiers vd., 2011).

### *Tek Yönlü Şekil Hafıza Etkisi*

Tek Yönlü Şekil Hafıza Etkisi (TYŞHE), martenzit fazda deforme edilmiş bir ŞHA'nın östenit faza dönüşümü sonrası gerçekleşmektedir. Bu davranış, ŞHA'larda gözlemlenen termoelastik martenzitik dönüşümün kalıcı bir karakteristiğidir (Nurveren, 2008). ŞHA ikizlenmiş bir martenzit fazındayken, ikizlenme başlangıç geriliminden daha büyük veya ona eşit bir gerilme uygulayarak, baskın bir kristal yönelim oluşturulabilir. Bu durum, ŞHA'nın geometrisinde makroskobik bir "plastik" değişim ile sonuçlanmaktadır. Gerilme ortadan kaldırıldığında numune deformasyon öncesi şeklini geri kazanmayacaktır. Orijinal geometriye geri dönmek için (yani görünüşte plastik gerinimi geri kazanılabilmek için) nispeten yüksek bir sıcaklık değerine çıkarılan numune tamamen

östenit faza dönüştürülür ve deforme olmamış şeklini östenit fazda geri kazanır. Bu fenomen, TYŞHE olarak adlandırılmaktadır (Henrickson, 2014).

Sıcaklığın tekrar düşürülmesi sonucu martenzit faz durumuna geçecek olan ŞHA'lar östenit fazdaki geometrilerini koruma eğilimindedir. (Güdeloğlu, 2014). Martenzit fazdaki numuneye deformasyon uygulandığı taktirde geometri bozulmaktadır. Deformasyon sonrası oluşan geometri, numune östenit fazdaki bir sıcaklığa ısıtıldığında ortadan kaldırılarak numunenin tekrar orijinal şeklini kazanması mümkün olmaktadır (Soğuksu, 2006).

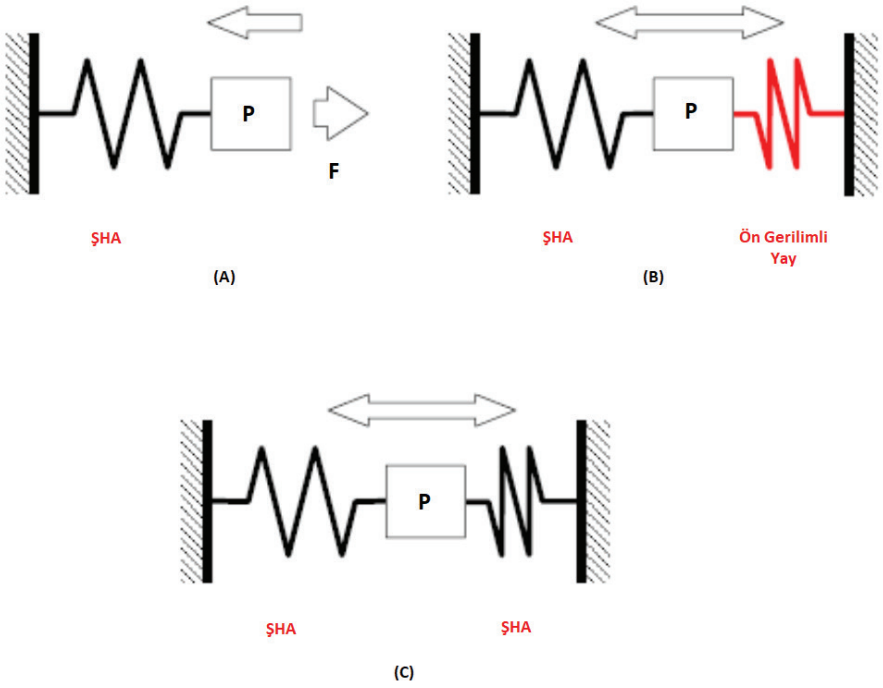
Çeşitli formdaki ŞHA'lar, ingot durumda iken şekil hafıza kazanabilme yeteneğine sahiplerdir. Alaşımın hafızasına kazandırılmak istenen bir şekil için kesinlikle ısıl işlem prosedürleri ve yük (gerilme) uygulamalarını içeren termomekanik, mekanik veya termal şekil hafıza eğitimi gerekmektedir. Şekil hafıza eğitiminin ilk safhası çözeltiye alma işlemidir. İkinci safhada ise alaşım martenzit fazda iken deformasyona uğratılarak, alaşıma kazandırılmak istenen şekil verilmektedir. Alaşımın yeni verilen şeklini koruyabilmesi için bir kalıbın içerisine yerleştirilerek ısıl işleme tabi tutulması gerekmektedir. Kalıp içerisine konulmasına müteakip ısıl işlem gerçekleştirilir ve alaşım suda soğutularak kalıptan çıkarılır. Suda soğutma sonucunda martenzit faz sıcaklığına ulaşan alaşım TYŞHE kazanmış bulunmaktadır (Dilibal, 2005).

### *Çift Yönlü Şekil Hafıza Etkisi*

Çift Yönlü Şekil Hafıza Etkisi (ÇYŞHE), östenit fazda yüksek sıcaklık şekli, martenzit fazda ise düşük sıcaklık şeklinin hafızasına sahip olma durumudur ve sıcaklığın değiştirilmesi sonucu oluşan martenzitik dönüşüm ile bu iki şekil arasında tekrarlanabilir bir şekilde dönüşüm sağlanabilmektedir (Urbina vd., 2010).

Bu konu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, tercihen yönlenmiş olan martenzit varyantların oluşumunu iki mekanizma ile açıklamaktadır. Bu mekanizmalar, yüksek sıcaklık fazının mikro yapısında martenzitin alıkonulması veya bu faz yapısında bir dizi dislokasyonların oluşmasıdır. Tercihli martenzit varyantlarının oluşmasında her iki durumunda etkisi oldukça yüksektir (Nurveren, 2008). Martenzitin düşük simetri

göstermesi nedeniyle aynı ana fazdan çok sayıda tercihli martenzit varyantı oluşabilmektedir. Sıcaklığın yükselmesi sonucunda kararsız martenzitik yapılar oluştuğu taktirde tersinir dönüşüm meydana gelir ve kristalografik olarak da dönüşüm tersinir ise martenzitler başlangıç oryantasyonlarındaki ana faza dönüşürler. Bu durum, atomların birbirleri ile uyumlu hareketlerine atfedilir (Altuğ, 2017). Birçok tasarımda (aktüatör gibi) ŞHA'ların tersinir özelliğinden yararlanılmaktadır (Şekil 5). ÇYŞHE özelliğine sahip bir aktüatör, yeniden yönlendirme kuvvetine ihtiyaç duymadan hem düşük sıcaklık hem de yüksek sıcaklık şekillerinin hatırlamasını mümkün kılmaktadır (Atli vd., 2013).

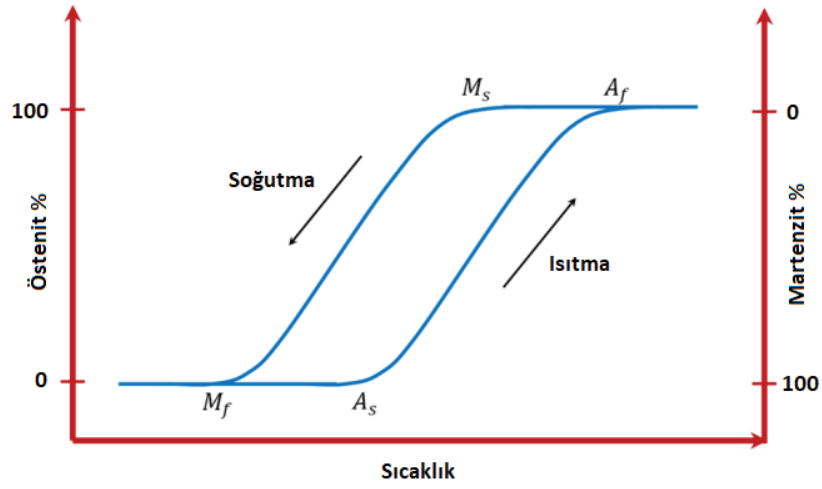



**Şekil 5. (a) TYŞHE, (b) Öngerilmeli, (c) ÇYŞHE aktüatör (Huang vd., 2002)**

ÇYŞHE ile stabilitesi yüksek ve kararlı şekil değişimi elde etmeyi sağlayan mikro yapısal gerilmeler üretmek amacıyla ısıl işlemler ve mekaniksel metotlar uygulanmaktadır. Bu amaçla, malzeme soğuk şekillendirilerek yapıda düzgün sıralı, yoğun martenzit tabakaları oluşturulmalıdır (Akdoğan ve Nurveren, 2003).

**Süperelastik Davranış**

Süperelastik davranış, ŞHA'ların yüksek deformasyon sonrası dışardan herhangi bir müdahale olmaksızın, oluşan deformasyonu geri kazanabilmesidir. ŞHA'lar sıcaklıktan bağımsız olarak (izotermal) $A_f$ sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta deformasyona maruz kalırsa martenzitik dönüşüm mekanik olarak gerçekleşecektir. Bu martenzit tipi, gerilme esaslı martenzit olarak bilinmektedir (Kurgun, 2019). Hafıza etkisinin tek izotermal uygulaması olan süperelastik geri kazanım, potansiyel enerjinin nispeten büyük ancak geri kazanılabilir gerilmeler yoluyla depolanmasını içermektedir (Mehrabi, 2011). Bu özellik ile alaşımlarda kalıcı şekil değişimleri olmadan izotermal koşullar altında mekanik yükleme/boşaltma sonucunda ilgili gerilme-gerinim histerezisi ile büyük gerinimler (yaklaşık %6-8) geri kazanılabilmektedir (Şekil 6) (Rao vd., 2015). SE davranışta faz dönüşümünü sağlayan itici güç kuvvet, ŞHE'de ise faz dönüşümünün itici gücü sıcaklıktır.




**Şekil 6. Süperelastik ŞHA'larda Dönüşüm Sıcaklık Eğrisi (Mohammed vd., 2019)**

ŞHA'ların sahip oldukları elastik ya da süperelastik özelliklerinden faydalanılarak tasarlanmış ve piyasaya sürülmüş birçok ürün vardır (Toptaş ve Akkuş, 2007). Özellikle biyomedikal alanda, ortodonti, or-

topedi, tıbbi aletler ve endovasküler uygulamalarda (stentler) başarıyla kullanılırken, ilaç dağıtım sistemleri ve ekstravazal yapı iskelesinde yeni gelişmeler beklenmektedir (Concilio vd., 2021).

## ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN EĞİTİM SÜREÇLERİ

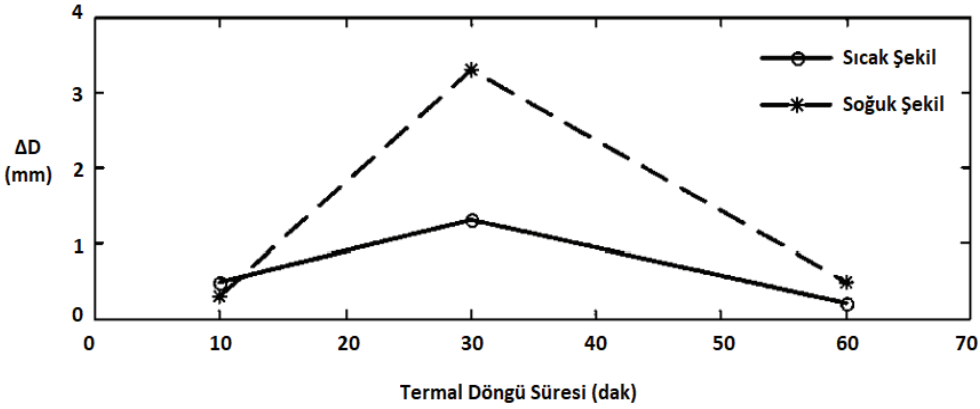
Hem sıcak bir şeklin hem de soğuk bir şeklin hafızasının alaşımın doğal bir özelliği olmadığı, bunun yerine "öğrenilmiş" veya "eğitilmiş" bir davranış olduğu iyi bilinmektedir. ÇYŞHE oluşturma süreci genellikle hammaddeye ısıl işlem uygulanarak belli bir şeklin sıcak şekil olarak ezberlenmesi yani TYŞHE oluşturulması ile başlamaktadır (Luo vd., 2007). Ardından, termal, mekanik veya termomekanik eğitime dayanan çeşitli eğitim yöntemleriyle ÇYŞHE elde edilebilmektedir.

ŞHA'larda eğitim, histerezis yanıtı tutarlı ve aynı hale gelene kadar malzemenin tekrar tekrar yüklenmesi ve boşaltılması prosedürünü ifade etmektedir (Ansari vd., 2018). Dönüşüm sıcaklığı ve histerezis genişliğinde değişme ile makroskobik dönüşüm zorlanmasında azalmayla sonuçlanabilecek eğitim için optimal şartları belirlemek zordur. Eğitim döngüsü (çevrim) sayısı yetersiz ise çift yönlü "kararsız" ŞHE oluşur. Aşırı eğitim döngüsü ise eğitimin verimini azaltan istenmeyen etkiler oluşturmaktadır (Kaya vd., 2016). Bu nedenle, ÇYŞHE eğitimine yönelik literatürde farklı prosedürler bulunmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen eğitim döngüleri ve birbirlerine olan üstünlükleri değerlendirilmiştir.

### Termal Eğitim

TYŞHE kazandırılmış alaşımlar belirli bir geometriye gerilme uygulanarak kenetlendirilip ardından bir süre ısıl işleme maruz bırakıldığında ve bu işlem art arda (döngüsel olarak) tekrarlandığında "yeniden ısıtma" işlemiyle ÇYŞHA eğitimi gerçekleştirilmiş olmaktadır. ŞHA'ları eğitmek için gerçekleştirilen eğitim döngüsü sayısı, histerezis tepkisini stabilize edebilmek adına önemlidir (Taha vd., 2015). Belirli bir çap ya da uzunlukta tutucular ile sabitlenen ŞHA numuneler için literatürde önerilen eğitim amaçlı bekletilme süreleri 10-60 dakika (Şekil 7), bekletilme sıcaklığı aralıkları ise 400-600 °C'dir. İlk döngülerde deney numuneleri TYŞHE formlarını hatırlama eğiliminde iken artan döngü sayıları (100

tekrar ve üzeri) beraberinde ÇYŞHE'nin stabilize edilmesi için yeterli olabilmektedir. Uzun tekrarlı eğitimlerde ise ÇYŞHE ile kazandırılan şekil baskın olurken TYŞHE'nin zarar görmesi kaçınılmazdır (Huang ve Toh, 2000).




**Şekil 7. Termal Döngüler ile ÇYŞHE Stabilizasyonu (Huang ve Toh, 2000)**

Termal döngü sırasında uygulanan gerilme seviyesi, eğitilen malzemenin genel şekil hafıza davranışını tanımlayan bir diğer önemli parametredir. Düşük bir gerilme, termal döngü sırasında martenzit varyantlarını tamamen yeniden yönlendirmek için yeterli olmayabilir ve bu nedenle güçlü bir eğitim etkisine neden olmayabilir; yüksek gerilmeler ise martenzit stabilizasyonu ile sonuçlanan plastik deformasyona neden olabilirken, esasen dönüşüm hacminin miktarını azaltır (Karakoç vd., 2020).

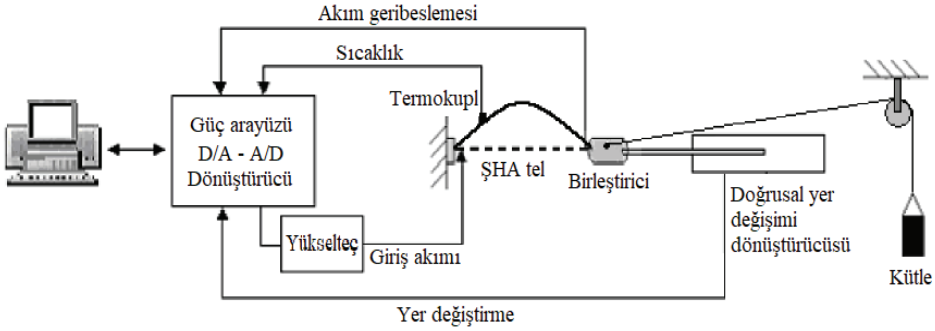
### Mekanik Eğitim

ÇYŞHE'nin pratik olarak elde edilmesinde mekanik yöntem en uygun süreçlerden birisidir. Alaşımların B19 veya B2 fazlarında yüksek deformasyona maruziyetleri ile ÇYŞHE kazandırmaya yönelik süreç tamamlanmaktadır. ŞHA'lara mekanik yöntem kullanılarak gerçekleştirilen yüksek deformasyon, basma, eğilme, haddeleme ve çekme gibi mekanik kuvvetler yardımıyla sağlanabilmektedir. Mekanik yöntem sırasında meydana gelen yüksek oranda plastik gerinimler ve homojen

olmayan iç gerilme alanları ÇYŞHE'yi olumsuz etkilemektedir. Eğitim yönteminin düşük oranlarda (yaklaşık olarak %1-2) ÇYŞHE sağlıyor olması, yüksek deformasyonun meydana getirdiği olumsuz iç yapı ve elde edilen ÇYŞHE'nin ticari uygulamalara yanıt verecek düzeyde olmaması sebebiyle ŞHA'ların eğitilmesinde tercih edilmemektedir.

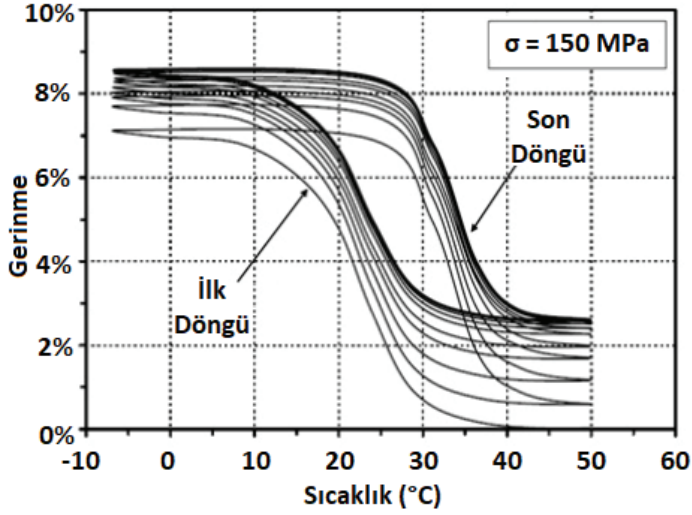
**Termomekanik Eğitim**

Termomekanik eğitim, alaşımlara sabit gerilme altında yükler uygulama (çekme, basma veya bükme işlemleri) sonrasında deforme edilen alaşımların B2→B19 veya B19→B2 martenzitik dönüşümlerini içeren döngülerin tekrarına dayanmaktadır. Termomekanik eğitim sürecinde (B2 ve B19 durumda) alaşımlar mekanik yüklemeler sonucunda deforme edilmektedir (Şekil 8). Malzemenin plastik deformasyonu nedeniyle oluşan dislokasyonlar ve kristal yapı kusurları stabilize olarak sonraki faz geçişlerinde bozulmayan artık gerilmeleri sağlamaktadır. Yaklaşık 20-30 eğitim döngüsünden sonra, sabit bir ÇYŞHE gözlemlenebilmektedir.




**Şekil 8. Termomekanik eğitim metoduna ait şematik görünüm (Luo vd., 2007)**

Termomekanik eğitimler sırasında yük uygulanan gerilme seviyeleri ve yüklerin uygulanma şekilleri, döngü (çevrim) sayıları, ısıl işlem süreleri ve sıcaklıkları, stabilitesi yüksek ÇYŞHE elde edilmesinde önemli parametrelerdir (Şekil 9). ÇYŞHE'nin maksimum değerde elde edilmesi için gerçekleştirilen çalışmalarda, alaşımlara yük uygulama fazı (B2 veya B19) ve çevrimlerdeki faz geçişlerine bağlı olarak çeşitli termomekanik eğitim metotları geliştirilmiştir. Literatürde ve ticari uygulamalarda en sık tercih edilen termomekanik eğitimler Tablo 2'de verilmiştir.




**Şekil 9. Termomekanik Eğitimin Çevrimlere Bağlı olarak ÇYŞHE Üzerindeki Etkileri (Taha vd., 2015)**

**Tablo 2. ÇYŞHE için Uygulanan Termomekanik Eğitim Yöntemleri (Luo vd., 2007)**

| Eğitim | Eğitim Prosedürü |
|---|---|
| Şekil Hafıza Döngüsü | Numune $M_f$ sıcaklığının altına soğutulur.<br>Martenzit fazda istenen şekil uygulanır.<br>Yük (gerilme) ortadan kaldırılır.<br>Numune $A_f$ sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılır.<br>Yukarıdaki adımlar döngüsel olarak tekrarlanır. |
| Süperelastik Döngü | Numune süperelastik davranışın beklendiği $A_f$'nin üzerinde ve $M_d$'nin altındaki bir sıcaklığa ısıtılır.<br>Östenit fazda istenen şekil uygulanır.<br>Yük (gerilme) ortadan kaldırılır.<br>İkinci ve üçüncü adımlar döngüsel olarak tekrarlanır. |

| | |
|---|---|
| Birleşik (ŞHE ve SE) Döngü | Numune süperelastik davranışın beklendiği $A_f$'nin üzerinde ve $M_d$'nin altındaki bir sıcaklığa ısıtılır.<br>Östenit fazda istenen şekil uygulanır.<br>Yük (gerilme) ortadan kaldırılmadan numune $M_f$'nin altındaki bir sıcaklık değerine soğutulur.<br>Yük (gerilme) ortadan kaldırılır.<br>Yukarıdaki adımlar döngüsel olarak tekrarlanır. |
| Martenzitin Kısıtlanmış Döngüsü | Numune $M_f$ sıcaklığının altına soğutulur.<br>Martenzit fazda istenen şekil uygulanır.<br>Yük (gerilme) ortadan kaldırılmadan, numune kısıtlı durumda iken $M_f$ ve $A_f$ sıcaklıklarına ısıtılıp soğutulur.<br>Üçüncü adım döngüsel olarak tekrarlanır. |
| Gerilme Kaynaklı Martenzit Yaşlandırması | Numuneye kazandırılmak istenen şekil oda sıcaklığında yaklaşık 150-300 MPa gerilme aralığında uygulanarak sabitlenir.<br>Numune sabit sıcaklıkta (150-500 °C) uzun süreli (2-12 saat) bekletilerek yaşlandırma ısıl işlemi gerçekleştirilir.<br>Numune oda sıcaklığına soğutulur ve yük (gerilme) ortadan kaldırılır.<br>Yukarıdaki adımlar döngüsel olarak tekrarlanır. |

Şekil hafıza döngüsü, TYŞHE özelliğine sahip alaşımların $M_f$'den daha düşük sıcaklık değerlerinde istenilen geometriye yük uygulanarak sabitlenmesi ve beraberinde uygulanan gerilmenin ortadan kaldırılarak $A_f$'nin üzerindeki bir sıcaklık değerine ısıtılması işlemini kapsamaktadır. Benzer şekilde TYŞHE kazandırılmış alaşımlara uygulanan Süperelastik döngüler ise $A_f$'nin üzerindeki bir sıcaklık değerinde yük (gerilme) uygulanması ve gerilmenin ortadan kaldırılması ile gerçekleştirilmektedir. Bu eğitim metodunun şekil hafıza döngüsü eğitiminden farkı, gerilme maruziyeti numunenin martenzit yerine östenit faz yapısında gerçekleşiyor olmasıdır. Süperelastik döngüler sonucunda eğitilen numunelerde, eğitim sırasında oluşan dislokasyon yapıları ÇYŞHE'nin oluşumunda en önemli etkendir. Birleşik döngü ile ÇYŞHE eğitimlerinde numunelere $A_f$'nin üzerindeki bir sıcaklık değerinde yük uygulanır ve uygu-

lanan gerilme ortadan kaldırılmadan alaşım $M_f'$den daha düşük sıcaklık değerlerine soğutulur. Martenzitik dönüşüm gerçekleştiğinde alaşıma uygulanmış olan gerilme ortadan kaldırılır ve tekrarlanan döngüler ile ÇYŞHE eğitimi sonlandırılmaktadır. Martenzitin kısıtlanmış döngüsü ile elde edilen ÇYŞHE'de numuneler $M_f'$den daha düşük bir sıcaklık değerine soğutulmakta ve martenzit fazda çift yönlü olarak kazandırılmak istenilen forma kısıtlanmaktadır. Eğitim sırasında ortaya çıkan dislokasyon yapısı, martenzitik dönüşümler sırasında sıcaklığın artmasıyla tavlanmaktadır ve ÇYŞHE oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Gerilme kaynaklı martenzit yaşlanması genellikle tek kristalli alaşımların eğitilmesinde tercih edilmektedir. Bu eğitim metodu ile ŞHA'lar, belli gerilme aralıklarında (150-300 MPa) çift yön kazandırılmak istenilen şekillerine sabitlenerek sabit bir sıcaklıkta (150-500 °C) uzun süreli (2-12 saat) yaşlandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Yaşlanma işlemi sonrası ŞHA'lar oda sıcaklığına soğutulmakta ve soğutma sonrası eğitim metodu tekrarlanmaktadır. Gerilme kaynaklı martenzit yaşlanması metodunda, yüksek sıcaklığın yanı sıra yüksek gerilme değerleri de martenzit dönüşüm sıcaklıklarını etkilemektedir. Artan gerilme değerleri ile $A_s$ ve $M_f$ sıcaklıkları önemli ölçüde düşerek $A_s < M_s$ oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu durum, martenzitik dönüşümde yüksek enerji birikimini meydana getirmekte ve ters martenzitik dönüşümü tetiklemektedir.

Termomekanik eğitim yöntemlerinin arkasındaki prensip, eğitim sırasında üretilen, ancak dış gerilmelere ihtiyaç duymadan dönüşüm sırasında yapıya benzer martenzit varyantlarını indükleyen iç gerilme alanlarının oluşumunu içermektedir. Bu gerilimler, termomekanik eğitim sırasında üretilen dislokasyon dizileri gibi mekanizmalar, stabilize edilmiş gerilme kaynaklı martenzit tutulan martenzit simetrisi, nokta kusurları veya hizalanmış tutarlı çökeltiler tarafından oluşturulabilmektedir. Eğitim prosedürleri sırasında geliştirilen dahili gerilmeler, ÇYŞHE kararlılığını ve verimliliğini belirlemektedir (Benafan vd., 2012).

Alaşımlara ÇYŞHE kazandırmak için gerçekleştirilen termomekanik eğitimlerde kararlı bir yapı elde edilmesi yaklaşık 20-30 döngüsel tekrara dayanmaktadır. Artan döngü sayıları ile dislokasyon ve çökeltilerin oluşmasıyla geri dönüşü olmayan kusurlar meydana gelmektedir. Martenzit fazda uygulanan yüksek gerilme oranları plastik deformasyona

sebebiyet vererek elde edilecek ÇYŞHE oranını azaltabilmektedir. Dislokasyon yoğunluğunun mikroyapıdaki martenzit varyantlarının yeniden yönlendirilmesini engellemesiyle ÇYŞHE zayıflamaktadır. Termomekanik eğitim sırasında uygulanan gerilmelerin büyüklüğü, numunelerin martenzitik dönüşüm sıcaklıklarını değiştirebilmektedir. Çökeltilerin yönelimleri ÇYŞHE oranını artıran bir etken olabilirken, tercih edilen yüksek yaşlandırma sıcaklıkları martenzitik dönüşüm sıcaklıklarının değişmesine neden olarak ÇYŞHE oranını olumsuz etkilemektedir.

## SONUÇ

Çoğu durumda, ŞHA'lar hammadde olarak, yani şekil hafızasız olarak tedarik edildiğinden tek ve çift yönlü ŞHE kazandırmaya ve alaşımları eğitmek amacıyla prosedürler geliştirmeye ihtiyaç vardır. Prosedürlerin geliştirilmesi için ise malzemenin mekanik özelliklerini bilmek ve dönüşüm davranışlarını gerçekleştirme şartlarını anlamak mutlaka gereklidir. Bu çalışmada, ŞHA'ların fonksiyonel özellikleri ve martenzitik dönüşümü üzerine bilgiler verilmiştir. Bu bilgiler dahilinde tek ve çift yönlü ŞHE eğitimi prosedürlerine çalışmada yer verilerek eğitimlerin martenzitik dönüşüm ve kristalografi ile bağıntısı ele alınmıştır.

## KAYNAKÇA

Akdoğan, A., ve Nurveren, K. (2003). Şekil Hafızalı Alaşımlar. *Mühendis ve Makina, 44*(521), 35-44.

Altuğ, G. S. (2017). Nikel-Titanyum Alaşımlarının Katmanlı İmalat Teknolojisi ile Üretimi, Karakterizasyonu ve Özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, *Gedik Üniversitesi*.

Ansari, M., Fahimi, P., Baghani, M., and Golzar, M. (2018). An Experimental Investigation on Training of NiTi-Based Shape Memory Alloys. *International Journal of Applied Mechanics, 10*(04), 1850040.

Asanovic, V. D., Delijic, K. H., Leka, Z. B., and Bosnjak, B. (2004). The Effect of Heat Treatment on the Martensitic Transformation and Properties of Cu-Zn-Al Alloy. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 15*(4-5), 219-238.

Atli, K., Karaman, I., Noebe, R., Gaydosh, D. (2013). The Effect of Training on Two-Way Shape Memory Effect of Binary NiTi and NiTi Based Ternary High Temperature Shape Memory Alloys. *Materials Science and Engineering A, 560*, 653-666.

Benafan, O., Padula, S., Noebe, R., Sisneros, T., and Vaidyanathan, R. (2012). Role of B19′ Martensite Deformation in Stabilizing Two-Way Shape Memory Behavior in NiTi. *Journal of Applied Physics, 112*(9), 093510.

Concilio, A., Antonucci, V., Auricchio, F., Lecce, L., and Sacco, E. (2021). *Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural, and Biomedical Applications*. Butterworth-Heinemann.

Dağ, S. (2019). Ni-Mn-Sn Şekil Hafızalı Alaşımların Termal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi.*

Dilibal, S. (2005). Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşım Üretimi Ve Şekil Bellek Eğitimi. Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*.

Eggeler, G., Hornbogen, E., Yawny, A., Heckmann, A., and Wagner, M. (2004). Structural and Functional Fatigue of NiTi Shape Memory Alloys. *Materials Science and Engineering: A, 378*(1-2), 24-33.

Emre, A., ve Oktay, T. (2018). Havacılık Ve Uzay Uygulamalarında Şekil Hafızalı Alaşımlar. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7*(1), 335-349.

Gaikwad, P., Sayeed, M. A., and Sonkamble, A. (2016, 11-12 March). Shape Memory Alloys: a Review. *International Journal of Innovations in Engineering, Research and Technology*.

Grgurić, T. H., Manasijević, D., Kožuh, S., Ivanić, I., Anžel, I., Kosec, B., Bizjak, M., Govorčin Bajsić, E., Balanović, Lj., Gojić, M. (2018). The Effect of the Processing Parameters on the Martensitic Transformation of Cu-Al-Mn Shape Memory Alloy. *Journal of Alloys and Compounds, 765*, 664-676.

Güdeloğlu, S. (2014). Cu-Al-Mn Şekil Hafızalı Alaşımında Yaşlandırmanın Fiziksel Özellikler Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi*.

Gürlük, G. (2009). Niti Hafızalı Alaşım Şekilli Film Kaplamaların Üretilmesi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi*.

Güven, S. (2020). Yüksek Sıcaklık, Yaşlandırma ve Kriyojenik Koşulların Nikel-Titanyum Şekil Hafızalı Alaşımların Mekanik Özelliklerine ve Faz Dönüşüm Sıcaklıklarına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. *Karabük Üniversitesi.*

Güven, S., Altin Karataş, M., Gökkaya, H., ve Akınay, Y. (2022a), Experimental Investigation of the Effects of Aging and Cryogenic Treatments on the Mechanical Properties of Superelastic Nickel-Titanium Shape-Memory Alloys. *Proceedings of the Instution of Mechanical Engineering Part C*, *236*(12), 6752-6759.

Güven, S., Altın Karataş, M., Gökkaya, H., ve Akınay, Y. (2022b). Süperelastik NiTi Şekil Hafızalı Alaşımların Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklık ve Yaşlandırma Isıl İşleminin Etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 13*(1), 27-34.

Hayrettin, C., Karakoc, O., Karaman, I., Mabe, J., Santamarta, R., and Pons, J. (2019). Two Way Shape Memory Effect in NiTiHf High Temperature Shape Memory Alloy Tubes. *Acta Materialia, 163*, 1-13.

Henrickson, J. V. (2014). Characterization of Shape Memory Alloys using Artificial Neural Networks. Master of Science, *Texas A&M University.*

Huang, W., and Toh, W. (2000). Training Two-Way Shape Memory Alloy by Reheat Treatment. *Journal of Materials Science Letters, 19*(17), 1549-1550.

Huang, W. (2002). On the Selection of Shape Memory Alloys for Actuators. *Materials and Design, 23*(1), 11-19.

Huibin, Xu. (1991). Temperature Hysteresis in Shape Memory Alloys. *Chinese Physics Letters, 8*(5), 251.

Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M. A. (2014). A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities. *Materials and Design, 56*, 1078-1113.

Janke, L., Czaderski, C., Motavalli, M., and Ruth, J. (2005). Applications of Shape Memory Alloys in Civil Engineering Structures - Overview, Limits and New Ideas. *Materials and Structures, 38*(5), 578-592.

Karakoc, O., Atli, K., Evirgen, A., Pons, J., Santamarta, R., Benafan, O., Noebe, R. D., and Karaman, I. (2020). Effects of Training on the Thermomechanical Behavior of NiTiHf and NiTiZr High Temperature Shape Memory Alloys. *Materials Science and Engineering: A, 794*, 139857.

Kaya, M., Çakmak, Ö., Saygılı, T. Y., and Atli, K. C. (2016). Şekil Hafızalı Alaşımlarda Martensitik Faz Dönüşümü ve Şekil Hafıza Mekanizması. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences, 15*(3), 157-172.

Kurgun, M. A. (2019). CuAlMnFe Şekil Hafızalı Alaşımlarda Yaşlanmanın Karakteristik Dönüşüm Sıcaklıkları ve Kinetik Parametreler Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi*.

Li, B., Shen, Y., and An, Qi. (2020). Structural Origin of Reversible Martensitic Transformation and Reversible Twinning in NiTi Shape Memory Alloy. *Acta Materialia, 199*, 240-252.

Luo, H., Abel, E. W. (2007). A Comparison of Methods for the Training of NiTi Two-Way Shape Memory Alloy. *Smart Materials and Structures, 16*(6), 2543.

Mehrabi, K. (2011). Characterization and Optimization of the Two-Way Effect in Melt-Spun NiTi-Based Shape Memory Alloys. Doktora Tezi, *University of Leoben*.

Miyazaki, S., Otsuka, K., and Suzuki, Y. (1981). Transformation Pseudoelasticity and Deformation Behavior in a Ti-50.6 at% Ni Alloy. *Scripta Metallurgica, 15*(3), 287-292.

Mohammed, S. S., Mediha, K., Qader, I. N., and Dağdelen, F. (2019). The Developments of Piezoelectric Materials and Shape Memory Alloys in Robotic Actuator. *European Journal of Science and Technology*, (17), 1014-1030.

Nurveren, K. (2008). NiTi Alaşımında Şekil Hafıza Etkisinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*.

Ortı□n, J., and Delaey, L. (2002). Hysteresis in Shape-Memory Alloys. *International Journal of Non-Linear Mechanics, 37*(8), 1275-1281.

Otsuka, K., and Wayman, C. M. (1998). *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press.

Oudich, A., and Thiebaud, F. (2016). A Two-Way Shape Memory Alloy-Piezoelectric Bimorph for Thermal Energy Harvesting. *Mechanics of Materials, 102*, 1-6.

Pang, G., Jin, M., Zuo, S., and Jin, X. (2019). Martensitic Transformation and Superelasticity in Au7Cu5Al4 Shape Memory Alloy Microwires. *Intermetallics, 112*, 106527.

Rao, A., Srinivasa, A. R., and Reddy, J. N. (2015). *Design of shape memory alloy (SMA) actuators*, Springer.

Rottiers, W., Van den Broeck, L., Peeters, C., and Arras, P. (2011). Shape Memory Materials and Their Applications. *Samara State Aerospace University,* 1-12.

Sato, A., Kubo, H., and Maruyama, T. (2006). Mechanical Properties of Fe–Mn–Si Based SMA and the Application. *Materials Transactions, 47*(3), 571-579.

Shaw, J. A., Kyriakides, S. (1995). Thermomechanical Aspects of NiTi. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 43*(8), 1243-1281.

Shuitcev, A., Vasin, R. N., Fan, X. M., Balagurov, A. M., Bobrikov, I. A., Li, L., Golovin, I. S., Tong, Y. X. (2020). Volume Effect upon Martensitic Transformation in Ti29. 7Ni50. 3Hf20 High Temperature Shape Memory Alloy. *Scripta Materialia, 178*, 67-70.

Soğuksu, A. K. (2006). Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni ve Cu-Zn-Al Alaşımların Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.*

Sun, L., Huang, W. M., Ding, Z., Zhao, Y., Wang, C. C., Purnawali, H., Tang, C. (2012). Stimulus-Responsive Shape Memory Materials: a Review. *Materials and Design, 33*, 577-640.

Tadaki, T., Otsuka, K., and Shimizu, K. (1988). Shape Memory Alloys. *Annual Review of Materials Science, 18*(1), 25-45.

Taha, O., Bahrom, M. B., Taha, O. Y., and Aris, M. S. (2015). Experimental Study on Two Way Shape Memory Effect Training Procedure for Nitinol Shape Memory Alloy. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 10*(17), 7847-7851.

Taştan, H. C. (2022). Traınıng Effect on the Two-Way Shape Memory Behavior of NiTiHf High Temperature Shape Memory Alloy. Yüksek Lisans Tezi, *Hacettepe Üniversitesi*.

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

Traleski, A. V., Vurobi Jr, S., and Cintho, O. M. (2012). Processing of Cu-Al-Ni and Cu-Zn-Al Alloys by Mechanical Alloying. *Materials Science Forum*, *727-728*, 200-205.

Urbina, C., De la Flor, S., Ferrando, F. (2010). R-phase Influence on Different Two-Way Shape Memory Training Methods in NiTi Shape Memory Alloys. *Journal of Alloys and Compounds, 490*(1-2), 499-507.

Urbina Pons, C. (2011). Improvement of the One-Way and Two-Way Shape Memory Effects in Ti-Ni Shape Memory Alloys by Thermomechanical Treatments. Doktora Tezi, *University of Rovira i Virgili*.

Van der Wijst, M. W. M. (1992). Shape Memory Alloys Featuring Nitinol. *Technische Universiteit Eindhoven, 1992.085*, 85-92.

Yang, S., Zhang, F., Wu, J., Lu, Y., Shi, Z., Wang, C., Liu, X. (2017). Superelasticity and Shape Memory Effect in Cu–Al–Mn–V Shape Memory Alloys. *Materials and Design, 115*, 17-25.

Yang, Y., Zhan, J. B., Li, B., Lin, J. X., Gao, J. J., Zhang, Z. Q., Ren, L., Castany, P., Gloriant, T. (2019). Laser Beam Energy Dependence of Martensitic Transformation in SLM Fabricated NiTi Shape Memory Alloy. *Materialia, 6*, 100305.

Yaşar, F. (2006). Thermomechanical Characterization of Ti-Rich TiNi Shape Memory Alloys H. Yüksek Lisans Tezi, *Middle East Technical University*.

Zhu, J., Wu, H-H., Wu, Y., Wang, H., Zhang, T., Xiao, H., Wang, Y., Shi, S-Q. (2021). Influence of $Ni_4Ti_3$ Precipitation on Martensitic Transformations in NiTi Shape Memory Alloy: R Phase Transformation. *Acta Materialia, 207*, 116665.