

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nİ-Tİ ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMA SİLİSYUM TAKVİYESİYLE TEL
EROZYONDA İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

FİKRİ BATALALP BABANİKOĞLU

UYGULAMALI BİLİMLER VE TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. MEHMET ALTUĞ

OCAK 2026

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nİ-Tİ ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMA SİLİSYUM TAKVİYESİYLE TEL
EROZYONDA İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

FİKRİ BATALALP BABANİKOĞLU
(36223631014)

UYGULAMALI BİLİMLER VE TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. MEHMET ALTUĞ
Eş Danışman: Doç. Dr. GÖKHANKIRAT

OCAK 2026

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın **Prof. Dr. Mehmet ALTUĞ**'a,

Çalışmalarım süresince maddi manevi her türlü desteğini esirgemeyen hocam Sayın **Doç.Dr. Gökhan KIRAT**'a,

Numunelerin hazırlanmasında gösterdiği katkılardan dolayı Sayın **Yaşar KÖRDÜĞÜM**' e

Çalışmalarımda benden desteklerini esirgemeyen her daim yanımda olan eşim ve çocuklarıma,

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Doktora veya yüksek lisans tezi olarak sunduğum “**Ni-Ti Şekil Hafızalı Alaşıma Silisyum Takviyesiyle Tel Erozyonda İşlenebilirliğinin İncelenmesi**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Fikri Baturalp BABANİKOĞLU

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ.....	i
ONUR SÖZÜ.....	ii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
SIMGELER ve KISALTMALAR.....	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	10
1.1. Tezin Amacı.....	11
1.2. Literatür Özeti.....	11
2. KURAMSAL TEMELLER.....	20
2.1. Akıllı Malzemeler.....	20
2.1.1. Akıllı malzemelerin sınıflandırılması ve uygulama alanları.....	21
3. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR.....	24
3.1. Şekil Hafızalı Alaşımların Tarihçesi.....	24
3.2. Şekil Hatırlama Etkisi.....	24
3.2.1. Martenzit faz dönüşüm.....	26
3.2.2. Tek yönlü şekil hafıza etkisi.....	27
3.2.3. Çift yönlü şekil hafıza etkisi.....	27
3.3. Süperelastikiyet.....	28
3.4. Şekil Hafızalı Alaşımların Üretim Teknikleri.....	29
4. TEL EROZYON.....	30
5. MATERYAL VE METOT.....	33
5.1. Numune Üretimi.....	33
5.2. X Işını Kırınımı Analizleri (XRD).....	34
5.3. Metallografik Hazırlama İşlemleri.....	35
5.4. Enerji Dağılımlı X-Işınları (EDX) ve Elementel Haritalama (Mapping)	
Analizleri.....	35
5.5. Optik Mikroskop Analizleri.....	36
5.6. Tel Erozyon İle İşlenebilirlik.....	36
5.7. Kerf Genişliği.....	38
5.8. Yüzey Pürüzlülüğü.....	38
6. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	39
6.1. XRD Analiz Sonuçları.....	40
6.2. EDX ve Elementel Mapping Analizleri.....	42
6.2.1. EDX noktasal analiz sonuçları.....	42
6.2.2. Elementel mapping analizleri.....	47
6.3. İşleme Parametrelerinin Kerf Üzerindeki Etkisi.....	52
6.4. İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi.....	54
7. SONUÇLAR.....	56
KAYNAKLAR.....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 :	Çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri.....	38
Çizelge 6.1 :	Silisyum içeriğiyle kırınım pikine dayalı olarak hesaplanan kübik örgü parametreleri.....	42
Çizelge 6.2 :	Ortalama atomik yüzde değerleri.....	42
Çizelge 6.3 :	Deney tasarımı ve sonuçlar.....	52
Çizelge 6.4 :	Kerf için varyans analizi.....	53
Çizelge 6.5 :	Kerf için regresyon deklemleri.....	54
Çizelge 6.6 :	Yüzel pürüzsüzlüğü için varyans analizi.....	55
Çizelge 6.7 :	Yüzey pürüzlülüğü için regresyon deklemleri.....	55



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 :	William J. Buehler.....	24
Şekil 3.2 :	Şekil hafıza etkisi (a) ve eneklik (b).....	25
Şekil 3.3 :	Sıcaklığa bağlı ŞHA'nın faz yapıları, fazların dönüşümleri.....	25
Şekil 3.4 :	Sıcaklık ile meydana gelen östenit- martenzit faz dönüşümünün şematik gösterimi.....	26
Şekil 3.5 :	Kayma (a) ve ikizlenme (b) mekanizmasının şematik gösterimi.....	27
Şekil 3.6 :	Tek yönlü şekil hafıza mekanizması.....	27
Şekil 3.7 :	Çift yönlü hafıza etkisinin sıcaklıkla değişimi.....	28
Şekil 3.8 :	Süperelastik mekanizmasının şematik gösterimi.....	28
Şekil 3.9 :	ŞHA'nın üretim teknikleri.....	29
Şekil 4.1 :	Elektro erezyonla işleme şeması.....	30
Şekil 4.2 :	Tel erozyon işleme prosesi.....	32
Şekil 5.1 :	Ark eritme sisteminin şematik gösterimi.....	34
Şekil 5.2 :	Akkor olana kadar eritilen numunenin fotoğrafı.....	34
Şekil 5.3 :	DeneySEL iş akış şeması.....	37
Şekil 5.4 :	ONA AF25 marka ve model CNC tel erozyon tezgâhı ve kısımları...	37
Şekil 5.5 :	Kerf genişliği.....	38
Şekil 6.1 :	Ni ₅₂ Ti ₄₈ ve Si katkılı tüm numunelere ait oda sıcaklığında ölçülmüş XRD desenleri.....	40
Şekil 6.2 :	x=0 numunesine ait EDX spektrumu ve normalize edilmiş ağırlıkça (wt.%) ile atomik yüzde (at.%) kompozisyon değerleri. Spektrumda yalnızca Ni ve Ti elementlerine ait karakteristik K-serisi pikleri gözlenmektedir.....	43
Şekil 6.3 :	x=1 numunesine ait EDX spektrumu ve normalize edilmiş kompozisyon sonuçları. Ni ve Ti piklerine ek olarak Si elementine ait karakteristik piklerin ortaya çıktığı görülmektedir.....	44
Şekil 6.4 :	x=2 numunesine ait EDX spektrumu ve kantitatif elementel analiz sonuçları. Artan Si katkısına bağlı olarak Si pik şiddetinin yükseldiği gözlenmektedir.....	45
Şekil 6.5 :	x=3 numunesine ait EDX spektrumu ve normalize edilmiş wt.% ve at.% değerleri. En yüksek Si içeriğine karşılık gelen spektrumda Si pik yoğunluğu belirgin şekilde artmıştır.....	46
Şekil 6.6 :	Saf Ni ₅₂ Ti ₄₈ alaşımı için mapping görüntüleri	48
Şekil 6.7 :	Si içeriği için mapping görüntüleri.....	49
Şekil 6.8 :	%2 Si içeriği için mapping görüntüleri.....	50
Şekil 6.9 :	%3 Si içeriği için mapping görüntüleri.....	51
Şekil 6.10 :	Parametrelerin Kerf üzerine etkisi.....	53
Şekil 6.11 :	Parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	54

SİMGELELER ve KISALTMALAR

Af	: Östenit bitiş sıcaklığı
As	: Östenit başlangıç sıcaklığı
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
Kerf	: Tel erozyonla işleme sırasında oluşan kesme aralığı
Mf	: Martenzit bitiş sıcaklığı
Ms	: Martenzit başlangıç sıcaklığı
Ni-Ti	: Nikel-Titanyum alaşımı
OM	: Optik Mikroskop
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
ŞH	: Şekil hafıza
ŞHA	: Şekil hafızalı Alaşım
ŞHE	: Şekil Hafıza Etkisi
ŞHÖ	: Şekil Hafıza Özelliği
TYŞHÖ	: Tek Yönlü Şekil Hafıza Özelliği
ÇYŞHÖ	: Çift Yönlü Şekil Hafıza Özelliği
ÇYŞHE	: Çift Yönlü Şekil Hafıza Etkisi
WEDM	: Tel Erozyon
XRD	: X-Işını Kırınımı
T_M	: Östenitten Martenzite Geçiş Sıcaklığı
T_A	: Martenzitten Östenite Geçiş Sıcaklığı
t	: Zaman
AM	: Akıllı Malzemeler

HS : Histerizasyon
MA : Mekanik Alaşımlama



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Nİ-Tİ Şekil Hafızalı Alaşıma Silisyum Takviyesiyle Tel Erezyonda İşlenebilirliğinin
İncelenmesi

Fikri Baturalp BABANİKOĞLU

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Uygulamalı Bilimler ve Teknolojileri Anabilim Dalı

63+ix sayfa

2026

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ALTUĞ

Bu çalışmada, Ni-Ti şekil hafızalı alaşıma Si elementi katılarak üretilen numunelerin yapısal ve tel erozyonda işlenebilirlik özellikleri incelenmiştir. Numuneler %1,2,3 silisyum içerecek şekilde numuneler hazırlanmıştır. Ark eritme yöntemiyle külçe formda üretilmiştir. İstenilen kristal kafes yapısını elde edebilmek için numuneler 870 °C’ de 24 saat ısıtma işlemine tabi tutulmuş ve ardından buzlu suda soğutulmuştur. Kristal yapıyı incelemek için XRD analizleri yapılmıştır. Ölçüm oda sıcaklığında incelendiğinde bütün numunelerin östenit fazda olduğu tespit edilmiştir. Si katkı oranı arttıkça, Si sinyal yoğunluğunun tüm analiz alanı boyunca düzenli biçimde arttığı; ancak belirli bölgelerde yığılma, ada oluşumu ya da Si zengin ikincil fazlara işaret eden lokal yoğunluk artışlarının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Si atomlarının Ni-Ti matrisinde çözündüğünü ve alaşımanın kimyasal olarak tekdüze bir yapı sergilediğini göstermektedir.

EDX analizleri, farklı bölgelerden alınan noktasal ölçümler üzerinden gerçekleştirilmiş olup, Si ilavesi yapılan numunelerde Si elementine ait karakteristik piklerin belirgin şekilde ortaya çıktığı ve Si içeriğinin katkı oranı arttıkça düzenli bir artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Numunelerin mikro yapısal ölçekteki elementel dağılımını incelemek amacıyla gerçekleştirilen elementel mapping analizleri, Ni, Ti ve Si elementlerinin tüm numune yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir.

Kesme genişliği kerf açısından değerlendirildiğinde, ANOVA sonuçlarına göre silisyum oranı %79,18 ile en baskın parametre olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için silisyum oranı %73,30 katkı oranı ile en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Burada silisyum değeri %2’ye kadar Ra değerini düşürmüş daha fazla oranda katıldığında tekrar artırmıştır. Bu bağlamda alaşıma %2’ye kadar silisyum katılması, Ra üzerinde etkili olacaktır. En uygun kerf değerinin %2 silisyum içeren numunenin time off 200 µs’ de dielektrik bar basıncı 14 bar Wire feed 10 m/min’de 246 µm olarak tespit edilmiştir. En uygun Ra değerleri yine %2 silisyum içeren numunenin Time off 200 µs’ de dielektrik bar basıncı 14 bar Wire feed 10 m/min’de 2,34 µm olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ni-Ti Şekil Hafızalı Alaşım, Isıl İşlem, Tel Erezyon, İşlenebilirlik

ABSTRACT

Master Thesis

Investigation of the Machinability of Ni-Ti Shape Memory Alloy with Silicon
Reinforcement in Wire EDM

Fikri Baturalp BABANİKOĞLU

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Applied Sciences and Technologies

63+ix sayfa

2026

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ALTUĞ

In this study, the structural and wire erosion machinability properties of samples produced by adding silicon to Ni-Ti shape memory alloy were investigated. Samples were prepared to contain 1%, 2% and 3% silicon. They were produced in ingot form using the arc melting method. To obtain the desired crystal lattice structure, the samples were subjected to heat treatment at 870 °C for 24 hours and then cooled in ice water. XRD analyses were performed to examine the crystal structure. When measured at room temperature, all samples were found to be in the austenite phase. As the Si addition ratio increased, the Si signal intensity increased regularly throughout the entire analysis area; however, no localised intensity increases indicating accumulation, island formation, or Si-rich secondary phases were observed in specific regions. This indicates that Si atoms dissolved in the Ni-Ti matrix and that the alloy exhibited a chemically uniform structure.

EDX analyses were performed on point measurements taken from different regions, and It was determined that characteristic peaks belonging to the Si element were clearly visible in the samples with Si addition and that the Si content showed a regular increase trend as the addition ratio increased. Elemental mapping analyses, performed to examine the elemental distribution of the samples at the microstructural scale, showed that the Ni, Ti, and Si elements were distributed homogeneously across the entire sample surface.

When evaluating the cutting width in terms of kerf, the silicon content was determined to be the most dominant parameter at 79.18% according to the ANOVA results. For surface roughness, the silicon content was determined to be the most effective parameter with a contribution rate of 73.30%. Here, the silicon value reduced the Ra value up to 2%, but increased it again when added in higher proportions. In this context, adding up to 2% silicon to the alloy will be effective on Ra. The most suitable kerf value was determined to be 246 μ at a dielectric bar pressure of 14 bar, wire feed of 10 m/min, and time off of 200 μ s for the sample containing 2% silicon. The most suitable Ra values were again determined to be 2.34 μ m for the sample containing 2% silicon at a time off of 200 μ s, a dielectric bar pressure of 14 bar, and a wire feed of 10 m/min.

Keywords: Ni-Ti Shape Memory Alloy, Heat treatment, WEDM, Machinability

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojinin ihtiyacı olan malzemeler yeni üretim teknikleri ile daha farklı malzeme ihtiyacını gündeme getirmiştir. Teknolojinin ilk safhasında, üretilen malzemenin ihtiyacı sağlam ve dayanıklı iken, günümüz teknolojisinde ise fonksiyonel, hafif ve maliyet açısından düşük olması istenmektedir. Bu malzemeler “akıllı malzemeler” sınıfını oluşturmaktadır. Bu sınıfın en önemlisi olarak da şekil hafızalı alaşımları örnek gösterebiliriz [1].

Akıllı malzemeler (AM); şekil hafızalı alaşımlar (SHA), termopiezoelektrik materyaller, fotovoltaiik malzemeler, magnetik şiddetli materyaller, piezo malzemeler, elektrolojikal akıcılar, ışıık yayan diyotlar, renk değıştiren malzemeler ve akıllı polimerler olarak örnekleyebiliriz. AM de en yaygın olarak kullanım alanı bunan SHA’dır [2].

SHA’nın mikroyapısı incelendiğinde, yük uygulanmadan önce faz martenzittir. Yük kaldırıldığında ve sıcaklık östenik faz sıcaklığına çıkarıldığında, yapı östenite dönüşür ve malzeme ilk şeklini geri döner. Bu döngü uygulanan yük ve östik faza geçiş ile gerçekleşir.

Difüzyonlu ve difüzyonsuz olarak gerçekleşen martenzitik faz dönüşümünü ilk başta alman fizikçi ve metalurjist olan Adolph Martens tarafından demir alaşımlı malzemelerde keşfetmiş ve bu dönüşüme martenzitik faz dönüşümü olarak adlandırılmıştır. Bunun üzerine daha sonraları yapılan araştırmalarda, martenzitik faz dönüşümü üzerine büyük gelişmeler kat edilmiştir. Demir esaslı alaşımların yanı sıra soy metaller, bakır esaslı alaşımlar ve bazı metal dışı malzemelerde de bu faz dönüşümü olduğu gözlenmiştir [2].

SHA üzerine ilk çalışma 1900’ lü yılların başında başlamış ve 1930’ lu yıllara gelindiğinde sıcaklık ve uygulanan kuvvetle daha fazla şekil değışimi gerçekleştiği tespit edilmiştir. 1932 yılında A. Ölander altın kadmiyum (Au-Cd) alaşımına sıcaklık atında uyguladığı kuvvetle büyük ölçüde şekil değıştirmeyi başarak superelastiklik (SE) özelliğini keşfetmiştir. Bu mekanizmanın belirli bir sıcaklık altında çalıştığını tespit etmiştir. 1937 yılında A.Greninger ve V. Mooradian, CuSn ve CuZn alaşımlarında martenzitik yapıyı dönüşümünü ilk olarak inceleyenler olmuşlar. 1949 yılında Kurdjumov&Kandros altın kadmiyum (Au-Cd) alaşımlarda termoelastik martenzit dönüşümünü tespit etmişler. 1951 yılına Chang and Read altın kadmiyum alaşımlarında gerçekleşen martenzitik yapının difüzyonsuz gerçekleştiğini inceleyerek ilk histeresiz (HS) eğrisini açıklamışlar. 1967 yılında Ni-Ti alaşımlarının üzerine çalışma yapan W.J. Buehler and F. Wang, Deniz Harp

Laboratuvarı'nda şekil hafıza özelliğini (ŞHÖ) keşfetmişler. Nitinol ismide bu laboratuvarın kısaltmasından gelmektedir (Naval Ordnance Laboratory) [3].

ŞHA'nın, ŞHÖ'nin kazanması östenik ve martenzit faz dönüşümünde meydana gelen termoelastik martenzit fazı sayesinde gerçekleşmektedir. SE özelliğinde, ŞHÖ'nden farklı olmakla beraber herhangi bir sıcaklık dönüşümü gereksinimi olmadan östenit dönüşüm sıcaklığı üzerinde (Af) mekanik yüklemeler kaldırıldığı ilk şekline geri dönebilme etkisidir. Şekil hafıza (ŞH) ve SE özelliği termoesaltik martenzit fazı sayesinde gerçekleşmektedir. Malzemenin alaşım içeriğine göre martenzit ve östenit fazlarının başlangıç ve bitiş sıcaklıkları değişkenlik göstermektedir [4].

1.1. Tezin Amacı

Ni-Ti şekil ŞHA'nın işlenebilirliği, bu malzemelerin mekanik özelliklerini koruyabilmek için özel bir hassasiyet gerektirir. Uygun işleme parametrelerinin belirlenmesi ve etkili soğutma yöntemlerinin kullanılması, Ni-Ti alaşımlarının işlenmesi sırasında oluşan olumsuz durumların, ŞH ve elastikiyetini özelliklerinin azalması ile birlikte yüzey pürüzsüzlüğü bozulması istenmeyen bir durumdur. Bu olumsuz yönlerini azaltarak daha verimli işleme parametrelerini belirlemek ve mekanik özelliklerini korumak, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak önem arz etmektedir. Literatüre bakıldığında silisyum ile alakalı çalışmanın çok fazla olmadığı görülmüştür. İşte bu çalışmayla Ni-Ti alaşımına eklenen silisyumun tel erozyonla işleme yönünden etkisini incelemek için yapılmıştır.

1.2. Literatür Özeti

Eren KAYA ve ark. ŞHA'nın işlenebilirliğini korumak üzerine çalışmışlar. Bu durum ŞHA'nın imalat sürecinde, üretim metodları kadar önem arz etmektedir. İmalat sürecinde, ŞHA'nın sert ve işlenebilirliğinin zor olaması, ŞHÖ'ni kabetmeden ve yüzey pürüzlülüğünü azaltmak klasik işleme yöntemleriyle zordur. Bunun için uygun kesme parametresi ve soğutma parametresi önem arz etmektedir. Yüzey kalitesinin artması için bunlar önemli parametrelerdir. Bu amaçla çeşitli uç takımları ve kesme hızları denenmiştir. Kesme hızları olarak, 25, 50, 75 ve 100 m/dk değerleri incelenmiştir. Düşük kesme hızından yüksek kesme hızına geçildikçe takım ömrünün arttığı ve çentik aşınma ile adezyon oluşumu önemli derecede azalmıştır [1].

M Losertová ve ark. Ni-Ti alaşımların ısıl işlem prosesiyle mikro yapı ve sertliğinin değişimini incelemişler. Ağırlıkça %55,8 Ni içeren Ni-Ti alaşımına 600 °C' de 1 saat

tavladıktan sonra su verme işlemi yaparak sertleştirme ısı işlemi yapmışlar ve 250, 270, 290, 300, 350, 400, 450, 500 °C’ de yaşlanma ısı işlemine tabi tutmuşlardır. Yaşlanma ısı işleminde sıcaklık arttıkça mikro yapı değişikliğinin ve sertliği arttığını mikro yapı incelemesinde tespit edilmiştir [5].

Ersin TOPTAŞ ve ark. ŞHA’nın uygulanan gerilmelere karşı mikro yapısındaki değişimleri sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişler. Bu amaçla faz değişimlerini incelemek için Msc.Marc/Mentat Sonlu Elemanlar Analiz programı ile araştırılarak gerilme-faz değişimleri ortaya konmuştur [6].

Ömer ÇAKMAK VE ark. ŞHÖ’nin ısı işlem sonrası meydana gelen mikro yapı ve süreli ya da değişken yükler altında mikro yapıda meydana gelen değişikliklerin termodinamik yasalarına uygun olduğunu, bunun içinde dönüşüm fazı olan martenzitik fazın termodinamiğini incelemişler. Martenzitik dönüşüm çeliklerde olduğu gibi birim hücrenin çarpılmasıyla, kayma ile değil ikizlenme sonucu oluşur. Martenzit yapı dönüşüm sırasında dışarıya ısı verirken, asıl şekle dönüşte ısı alarak yapı östenite dönüşmektedir. Bu dönüşüm, faz dönüşüm entalpilerine uygun olup termodinamik yasalarına uymaktadır [2].

Mehmet KAYA ve ark. ŞHA’nın faz dönüşümlerini ve ŞH mekanizmasını açıklamayı hedeflemişlerdir. ŞHA uygun termomekanik işlemler uygulandığında, üzerindeki etki kaldırıldığında tekrar ilk haline gelebilen malzemelerdir. Bu mekanizma, martenzit fazın deforme edildikten sonra üzerindeki yük kaldırılıp östenik fazına ısıtıldığında tekrar eski haline almasıdır. Mikro yapı termomekanik işlemler sonrası martenzit fazı ana faz olmuştur. Bu faz ikizlenme mekanizmasıyla gerçekleştiği için östenit fazı martenzit fazından daha serttir [7].

Canan Aksu CANBAY ark. oda sıcaklığı üzerinde dönüşüm regileyen Ni-Ti alaşımın 200°C de farklı sürelerde yapılan yaşlandırma işlemlerinin yapısal özelliklerine etkisini araştırmışlar. 1 saat sonraki yaşlandırma işlemlerinde karakteristik dönüşüm sıcaklığı %3-4 oranında düşüş sergilerken, 5 saatlik yaşlandırma ısı işlemine ise martenzik plakalarının nispeten büyüdüğü tespit edilmiştir. Bu analizde Ti-Ni alaşımlarının 200°C sıcaklıkta yapılan yaşlandırma işleminin yapısal olarak bir değişikliğe sebep olmadığı ve yüksek sıcaklıkta kullanım olanağı verdiği tespit edilmiştir [8].

Sevda ALTAŞ ve ark. koruyucu elbise arasındaki hava boşluğunu, ŞHA’ı kullanarak, arttırmak ve yanık oluşumunu için geçen süre uzatma ile koruyucu elbise performansını arttırmayı hedeflemişlerdir. Hava bariyerinin arasına yerleştirilen ŞHA’nın, radyan ve

konvektif ısıya karşı direncinin arttığı belirlenmiş. Isı artışında yay şeklindeki ŞHA'nın ilk şekline dönerek hava bariyerlerinin arttırarak koruyucu elbisenin dayanma süresini arttığı tespit edilmiş [9].

Merivan ŞAŞMAZ ark. NiMn temelli manyetik ŞHA'nın yüksek Mn içeriğinin martenzitik dönüşüm sıcaklığını manyetizasyon değerinin üzerine olan etkisini araştırmışlar. Eritme ark ocağında hazırlanan bileşim, 72 saat boyunca argon atmosferinde 900°C de ani soğutulmuş ve faz geçiş sıcaklıkları incelenmiştir. Manyetik ŞHÖ atom başına valans elektron konsantrasyon oranının Mn miktarının azalmasıyla artmakta olduğu tespit edilmiş olup uygulanan manyetik alan ve Mn miktarının artmasıyla martenzitik dönüşüm sıcaklığının arttığı tespit edilmiştir [10].

Fethi DAĞDELEN ve ark. bakırın ŞHA'nın dönüşüm sıcaklığına ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. ŞHA'nın içine %10' a kadar Cu eklemişler ve dönüşüm sıcaklığında ciddi değişim olduğu gözlenmişlerdir. Hatta %10 Cu ilavesinde ŞHÖ tamamen ortadan kaybolduğu tespit edilmiş olup bu durumun mikro yapıda çok fazla çökeltinin olmasıyla açıklamışlardır [11].

Savaş DİLİBAL ve ark. endüstriyel robotların uç etkiliyicisinin uygun kavrama yapabilmesi ve karmaşık hareketli yapma azaltma durumunu gösterecek etkileşim sorunları üzerine çalışmışlardır. Robot el üzerindeki parmakların gerekli etkileşimlerde kas yapısına benzer hareket etkisi yapan ŞHA'nın hata oranını düşürdüğü görmüşlerdir. Bu çalışma sonucunda uygun robotik kol yapım malzemesi olduğu tespit etmişlerdir [12].

Ayşeğül AKDOĞAN ve ark. ŞHA'nın dönüşüm sıcaklıkları, bu sıcaklıkların oluşumunu etkileyen şartları incelemişlerdir. Şekil hazıfalı alaşımlarda ŞHÖ sağlanan termoplastik martenzitik yapıdır. Bu yapı sadece Ni-Ti alaşımlarda değil demir esaslı ŞHA da gerçekleşen mekanizmanın kaynağıdır. Demir esaslı ŞHA da geri dönüşüm HS %4 ü geçmezken Ni-Ti alaşım elementleri SE özellik göstermektedir [13].

Hasan İsmail YAVUZ ve ark. biyo uyumluluğa etki eden implantların, vücut uyumuna uygun olamayan yüksek elastikiyetini ve içerdiği elementlerin toksit etkisine karşı biyo uyumluluğu yüksek elementlerle alaşımlandırmışlardır ve faz yapısıyla düşük elastiyete sahip B tipi alaşımların özelliklerini incelemişlerdir. Toz metalurji yöntemiyle üretim, biyomedikal malzeme üretimde en çok tercih edilen yöntemlerdendir. Bu yöntem, yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşım elementlerini eklenmesine olanak sağlamaktadır bununla

birlikte, bu yöntemle üretimin dezavantajı gözenekli yapı, elastikliği düşürerek uyumluluğu arttırmaktadır [14].

Ekim Onur ORHAN ve ark. kanal tedavisinde kullanılan klasik enstrümanların yerine Ni-Ti alaşımlarının kullanılmasını incelemişler. Oda sıcaklığında ŞHÖ'e sahip entrümental, kanal tedavisinde diş ve çene anatomisine uygun şekil alarak hem hastanın hemde uygulayıcının konforunu arttırmaktadır. Sert yapısı ve kanala uygun şekilde yönlenebilmesi, kanal tedavisi hazırlığında körlenme eğilimini azaltırken kanala yönelen Ni-Ti alaşımı işlem sırasında kanal şeklini alırken işlem sonrası ilk haline dönüş yaptığı görülmüştür. Buda çalışma verimini artırır [15].

Ceylan KARABUDAK ve ark. Ni-Ti ŞHA nadir toprak elementlerinden La ve Nd eklemişlerdir. Üretim yöntemi sırasında da boron ile birlikte sinterleyerek mekanik özellikleri ile birlikte mikro yapı değişimlerini incelenmişlerdir. Nd ve La elementleri MA yöntemi ile Ni-Ti alaşımına katılarak, toz metalurjik yöntemle preslenmiş, pres sonrası oluşan kırılgan ve gözenekli yapı önce sinterleme işlemi yapıldıktan sonra borlama işlemleri yapılırken bu denemede sinterleme işlemi ile birlikte borlama işlemi de beraber yapılarak verim almışlardır. La tozlarının artışı şekil hafıza özelliğini ortadan kaldırmakla beraber sertliğin arttığı gözlemlenmiştir. Nb eklenmesinde ise martenzit başlangıç sıcaklığı ile sertliğin arttığı tespit etmişlerdir.[3]

Metehan YILMAZ ve ark. ŞHA'nın dalma ve tel erezyonda işleme üzerine inceleme yapmışlardır. Akım, voltaj, kapasitans, frekans, vurum süresi, vurum ara süresi ve elektrot malzemesi gibi işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelemişlerdir. Ni-Ti alaşımlarının akım, voltaj ve kapasitans olduğunu tespit edip bu değerler arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmıştır. ŞHA elementlerinin elektrot erozyon ve tel erozyonla işleme yöntemleri incelemişler. İki işleme yönteminde de akım, voltaj ve vurum süresini arttırmak talaş alma ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı tespit edilmiştir [16].

Sedat GÜVEN ve ark. ŞHA'nın mikroyapı, yük altında mikro yapı değişimlerini ve kimyasal kompozisyonunu ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Eşit uzunluktaki numunelere kriyojenik ortam ve yaşlanma ısı işlemi uygulanmış. Oda sıcaklığı ve 140°C de çekme testi yapılmış. Taramalı elektron mikroskopuyla yüzey ve yüzey altı mikro yapı

görüntüleri incelenmiştir. Bu incelemede farklı faz yapıları elde edilmiş ve faz dönüşüm sıcaklığının düşmesi martenzitik yapının oluşumunu olumsuz etkilediği tespit edilmiştir [17].

Sedat GÜVEN ve ark. ŞHA'nın tek yönlü ve çift yönlü olarak eğitilebileceği konusu incelemişler. ŞHA eğitim prosesi uygulandığında hem tek yönlü hemde çift yönlü şekil hafıza özelliği kazanabilmektedirler. Tek yönlü şekil hafıza özelliği (TYŞHÖ), homojenleştir ısıtıl işleminden sonra kalıp içinde istenilen şekil verildikten sonra sertleşme ısıtıl işlemi ve takibinde yapılan yaşlanma ısıtıl işlemiyel kazanılır. Çift yönlü şekil hafıza özelliği (ÇYŞHÖ) ise yüksek sıcaklıkta östenitik fazda verilen şekil ile düşük sıcaklıkta martenzitik fazda verilen ŞHÖ'dir [4].

Sedat GÜVEN ve ark. Ni-Ti ŞHA'nın çekme testlerinden önce uygulanan yaşlandırma ısıtıl işleminin sertlik ve mukavemete etkisinin ve çekme testi sonrası kopma bölgesindeki kimyasal bileşim, çatlak oluşumu ve mekanik değişimleri incelemişlerdir. Yaşlanma ısıtıl işleme tabi tutulmuş numune ile tutulmamış numune arasında, iki numunede de intermetalik Ni_4Ti_3 ve Ti_2Ni fazları gözlemlenmiş, mikro sertliklerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Çekme ve akma testinde yaşlanma işlemine tabi tutulmamış numunede akma gerilmesi 361 MPa ve çekme gerilmesi 948 MPa iken yaşlanma ısıtıl işlemine tabi tutulmuş numune 232 MPa ve 737 MPa akma ve çekme gerilme değerleridir. Karbon elementi yaşlanma ve çekme testlerinde önemli ölçüde artmıştır. ŞHA'nın mekanik özellikleri, kimyasal bileşimlerle değişmektedir [18].

Sedat GÜVEN ve ark. Ni-Ti ŞHA'nın, ŞH, SE ve korozyona karşı dirençi gibi özelliklerinin biyo uyumluluk açısından çok büyük bir önemi vardır. Bu önem, biyo uyumluluğu arttırmak için çalışmaları arttırmış, biyo uyumluluğu yüzey kusurları azaltarak arttırabilme üzerine derleme yapmışlardır. Kimyasal yüzey parlatma işlemi ile yüzeyle koruyucu tabak oluşumu, safsızlıkların giderimi, oksijene karşı dayanımın artması ve yüzey kusurlarının giderilmesiyle biyo uyumluluğun arttığı tespit etmişlerdir [19].

Sedat GÜVEN ve ark. teknolojinin gelişmesiyle ŞHA'nın ihtiyacı ve bu bağlamda üretim ile imalat yöntemleri önem kazanmaktadır. Bu konuda ASJ yöntemiyle Ni-Ti alaşımlarının işlemisi incelemişlerdir. Yüksek hızlı su jeti ile işlemede Kerf açısıyla yüzey pürüzlülüğü sağlanabileceğini ancak su basıncı arttığında Kerf açısı azalarak yüzey

pürüzlülüğünü azalttığını, ilerleme hızı arttığında yüzey pürüzlülüğünün bozulduğunu ve mikro yapıda kısmen ergimelerin olduğunu tespit etmişlerdir [20].

İskender ÖZKUL ve ark Ni-Ti alaşımlarının sıcaklı, zaman ve soğuma şartlarına bağlı metelagrafik değişimlerini incelemiştir. İnceleme sonucunda, yaşlandırma ısı işleminde zamanın artması martenzitik faz yapısını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiş ve faz dönüşüm sıcaklığını etkilememiştir. Sıcaklık ile zaman artışı dislokasyon hareketlerini engelleyerek faz dönüşüm sıcaklıklarını arttırmış ancak soğuma şartları değiştirildiğinde dislokasyon hareketlerini kolaylaştırıp dönüşüm sıcaklıklarını düşürmüştür [21].

Hakan GÖKMEŞE ve ark. toz metalurji yöntemini kullanarak Ni-Ti alaşımının içine üçüncü bir element olarak Nb elementi katarak mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Ni-Ti alaşımına ağırlığınca %1, 2 ve 4 oranında Nb elementi eklenmiş. Nb elementi takviyesiyle titanyumca zengin fazların oluşumu gözlenmiş ve %4 Nb artışı mikro sertlikte % 30 oranında artışa sebep olmuştur [22].

Necdet DÜZGÖREN ve ark. Ni-Ti ŞHA'nın gerek kendi içerisinde gerek farklı elementler kullanarak kaynatılabildiğini ve mekanik özelliklerini koruyabildiklerini tespit etmişlerdir. ŞHA, ŞHÖ den dolayı yorulma kırılması gerçekleşerek kullanılmaz hale gelebilirler. Üretim maliyetinin yüksek olması bu malzemelerin kaynatılabilirlik özelliğinin üzerine durulması ihtiyacını meydana getirmiştir. Ni-Ti alaşımların kaynağını eğritmeli kaynak yöntemi kullanıldığından burdaki en önemli parametre, kaynak sırasında meydana gelen yüksek ısıdır. Bu ısı ITAB bölgelerinde mikro yapısı değiştirir ve mekanik özelliği olumsuz etkiler. Kaynak bölgesinde mikro çatlaklara sebebi TIG kaynağı, yaptıkları deneylerde, çıkan ısı kritik sıcaklığı aşmadığından kullanmışlardır. ITAB bölgesindeki çatlaklarıda Cu esaslı ara katman kullanılmış süneklik bir yapı elde edilmiş ve mikro yapısı sertleştirmiş olduğunu tespit etmişler [23].

Gülşen AKDOĞAN ve ark. klasik stent ve nitinol stentleri karşılaştırmışlar ve genel itibariyle mevcut stentlerin en büyük problemi olan kalıcı stentlerin stent içi tıkanmasını durumunu ele almışlardır. Bu bağlamda damar yoluna indirilen stentlerin hem biyo uyumluluk göstermesi hem de hücrelerle kaplanmaması gerekir. Klasik stentlerin aksine nitinol teller ŞHÖ den daha verimli uygulamaları olmuş fakat yüzeyde bulunan Ti elementi biyo uyumluluğa uygunken hücreler tarafından sarılarak stent içi tıkanıklığa neden olabilmektedir. Bunun için yüzey kaplama yapılmakta, yüzeyde bulunan diğer element Ni de, Ni elementine karşı hassasiyeti olanlarda uygun olmadığından elektro parlatma işlemiyle

yüzeydeki derişim oranı düşürölüp sadece TiO₂ bileşigi bulunacak hale geririlerek çözülmüştür [24].

Gizem ONAY ve ark. Nitinol alaşımlarının biyo uyumluluğunu, bu durumunu belirleyen yüzey özelliklerini elektro parlatma ve yüzey pasifleştirme işlemleriyle iyileştirmeye çalışılmıştır. Üç elektolit hazırlanmış ve elektro parlatma işleminden sonra yüzeyler karşılaştırılmıştır. K₁; sülfirik asit ve metanol, K₂; sülfirik asit ve hidroklorik asit, K₃; hidrojen peroksit ve hidroklorik asittir. En iyi verim K₃ elektrolitinden elde edilmiş TiO₂ bileşimi yüzey alanında artmış böylece litarütüre yeni bir eletrolit kazandırılmıştır [25].

Lütfü TÜYLEK ve ark. gelişen teknolojiyle ihtiyaç duyulan akıllı malzemenin ihtiyaç duyulan üretim proseslerinden biri olmaya aday 3D baskı teknolojinini incelemişlerdir. 3D baskı teknolojilerinin biyo uyumlu akıllı malzemelerin üretimde çeşitli nano ölçekte tozlar, lifler ve reçineler kullanılmıştır. Atomik kalınlıkta nano malzemelerin üretimi, baskı yönteminde büyük ve küçük parça mimarisinde kolaylık sağlamıştır [26].

Ercan ERCAN ve ark. TiNb alaşıma tantal elementi katarak mikro yapı ve dönüşüm sıcaklıklarını incelemişlerdir. Ta elementi ekleme sonrası, mikro yapı incelemesinde, bu elementin tane sınırlarına çökeldiği tespit edilmiş olup, martenzitik dönüşüm sıcaklığının oda sıcaklığının altında olduğu tespit edilmiştir [27].

Sabri BÜLBÜL ve ark TiMoNi alaşımını toz metalurji yöntemiyle üretip, Mo elementini %1, 3, 5, 8 ve 10 oranında ekleyip sinter fırınında 1200, 1225, 1250, 1275 ve 1300⁰C’ de sinterleme işlemi yapılmıştır. Mo oranı arttıkça mikro boşluk oranının da arttığı gözlenmiş olup, mikro yapıda da tane büyümesine neden olmuştur [28].

Sinan AKSÖZ ve ark. mekanik alaşımlama yöntemiyle Ni-Ti alaşım tozlarını üretmişlerdir. Numuneler 1200⁰C de yüksek saflıkta argon atmosferinde 120 dakika sinterlendikten sonra 900 ve 1000 derecede 6 ve 12 saat borlama işlemine tabi tutmuşlar. Yapılan borlama işleminde numunelerin tamamında yüzey sertlik artmıştır. En yüksek sertlik ise 1000 derece de 12 saat yapılan sinterleme işlemidir [29].

Tarık AYDOĞMUŞ ve ark. toz metalurji yöntemiyle üretilen Ni-Ti alaşımlarının mekanik yönden olumsuz tarafını gidermek amacıyla çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada toz metalurji yöntemiyle üretilen numunelerin gözenek oranlarının istenilen orandan fazla olması mekanik açıdan istenilen bir durum değildir. Üretim sırasında koruyucu atmosfer sayesinde oksijen ile muamelesi kesilip herhangi bir oksik bileşik oluşmamakla beraber

sinterleme işleminde magnezyum buharının kullanımıyla ikincil bir faz oluşumunun önüne de geçilmiştir [30].

Tarık AYDOĞMUŞ ve ark. köpük şeklinde üretilen Ni-Ti alaşımlarının gözenek yapısının artması durumunda ŞH ve dönüşüm sıcaklığına olan etkisini araştırmışlardır. Boşluk oranını % 53- 73 şeklinde ayarlamışlar. Bu oranda boşluk oranı %50 oranında olanlarda ŞHÖ de değişiklik fazla olmazken, % 70 oranında şekil hafıza ve elastikiyet özelliğinin %20 oranına kadar düştüğünü tespit etmişlerdir. Aynı şekilde dönüşüm sıcaklığının da boşluk oranı fazla olan numunelerde 25 derece arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni de oksit bileşiği oluşmaması için, sinterleme prosesinde kullanılan magnezyum buharı olduğu tespit etmişlerdir [31].

Muhammed Sait KANCA ve ark. Ni-Ti ŞHA'nın yüzeylerini gümüş, bakır ve selenyum elementleriyle kaplayarak karakterizasyon ve korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Termal buhar yöntemiyle yüksek basınç altında numuneler hazırlanmış kaplama işleminden sonra yüzey morfolojisi incelendiğinde bu üç elementte yüzeye homojen olarak kaplaması gerçekleşmiştir. Aynı şekilde biyo uyumluluk için gerekli olan yüzey pürüzlülüğünde her üç element için yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Korozyon açısından en dayanıklı selenyum element ile kaplama çıkarıken bakır ve gümüşte korozyona karşı dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir [32]

Murat AYYILDIZ ve ark. Ni-Mn manyetik ŞHA'nın manyetik özelliğinin Mn atomunun konumu, Mn ve diğer alaşım elementleriyle etkileşimi ve mesafesi belirler. Bu konuda Ni-Mn-Sb alaşımına Mo ve Cr elementi eklenerek Ni elementinin hizalanmasını ve yerinin sabit kalmasına katkıda bulunmasını sağlamaya çalışmışlardır [33].

İbrahim Nazer QADER ve ark. akıllı malzemelerin özelliklerini incelemişlerdir. Bunu incelemeyeyle özelliklerine göre sınıflandırmışlar ve uygulama alanlarına göre katagorilere ayırmışlardır [34].

Savaş DİLİBAL ve ark. şekil hafızalı nikel-titanyum alaşımı üretmek için ticari saflıkta nikel ve titanyum elementleri eş atomlu olacak şekilde vakum ark ve vakum indüksiyon ocağında 21 sarj döküm yaparak sıcaklıkla faz dönüşümlerini, mikroyapı değişimlerini ve sertliklerini, şekil bellek eğitimini incelemişlerdir [35].

Sepanta MANDEGARIAN ve ark. şekil hafızalı tellerle takviye edilmiş termoplastik cam elyaf kompozitlerin düşük hızda darbe ve darbe sonucu tekrar şekil kazanıma desteğini

incelemişlerdir. Liflerin ve istif sırasıyla şeklinin kompozit takviye malzemesinin çalışmalarda önem arz ettiğini ve verimli kıldığını tespit etmişlerdir [36].

Shifeng WEN ve ark. ŞHA'nın eklemeli imalat yöntemlerinde üretim yöntemi olarak seçici lazer ergitme yöntemi seçmişlerdir. Bu konuda diğer üretim yöntemleriyle üretilen ŞHA'nın mikro yapı ve mekanik yöntemlerini karşılaştırmışlar. Katman şeklinde üretilen ŞHA'nın mikroyapı da oluşacak kusurların ileştirmesinde yardımcı olduğu ve şekil verme prosesinde iç gerilmeleri azaltarak daha sağlıklı yapının oluşmasına olanak sağladığını vurgulamışlardır [37].

Daniela CASCADAN ve ark. Ti elementine eklenen alaşım elementlerinin mikroyapı, sertlik, korozyona olan direnci ve Ti ile Ni elementlerinin yaptığı bileşin yapısını incelemişler. Bu konuda %5, %10, %15, %20 Ni içeren numuneler hazırlanmış. %10 ve üzeri Ni eklenmesinde Ti' nin mikroyapısında diğer yapıların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ancak sertlik ve elastikiyetin değişmesi direkt Ni elementiyle alakalı olmayıp yapılan ısı işlemlerlede bağlantılı olduğu tespit etmişlerdir [38].

Mediha KÖK ve ark.vücuda yerleştirilen ŞHA elementlerinin vücut sıcaklığının altında martenzitik dönüşüm sıcaklığına sahip olması için çeşitli alaşım elementleri katarak çeşitli Ni-Ti alaşımları üretmişlerdir. Ni₄₅Ti₅₅Cr_{2.5}Cu_{2.5}, Ni₄₈Ti₅₁Mn ve Ni₄₈Ti₅₁ alaşımları 37,5 derecenin altında martenzitik dönüşüm gösterirken Ni₄₅Ti₅₅ ve Ni₄₈Ti₅₁Sn alaşımlarında ise 37,5⁰C üstünde martenzitik dönüşüm sıcaklığı göstermiştir. Bu dönüşümün mikroyapıdan meydana gelen diğer fazların yoğunluğu ile alakalı olduğunu tespit etmişlerdir [39].

Hassan Ali M.MESHRI ve ark. tel erezyon yöntemiyle ŞHA'nın işlenebilirliği incelemişlerdir. Bu konuda işlenebilirliği incelemek için parametreleri kısıtlayarak yüzey pürüzlülüğü ile Kerf açısının birbirine olan bağlantısını işleme parametreleriyle nasıl değiştiğini incelemişlerdir [40].

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Akıllı Malzemeler

AM, dış ortamdan gelen mekanik, termal, elektriksel, manyetik veya kimyasal uyarıları algılayabilen ve bu uyarılara belirli bir tepki üretebilen fonksiyonel malzemelerdir. Geleneksel mühendislik malzemeleri yalnızca yük taşıma, dayanım veya iletkenlik gibi pasif özellikler sunarken, AM sensör, aktüatör ve bazı durumlarda kontrol elemanı fonksiyonlarını kendi bünyesinde birleştirerek aktif bir malzeme davranışı sergiler. Bu nedenle modern mühendislikte AM, “algı–yorumla–tepki ver” döngüsünü yerine getirebilen yarı-otonom yapılar olarak kabul edilmektedir [41], [42].

AM kavramının bilimsel literatürdeki ilk kapsamlı tanımı Roger (1988) tarafından yapılmış olup, bu malzemeler; dış etkileri algılayabilen, bu uyarıyı dönüştürerek mekanik veya elektriksel tepki verebilen ve uyarı ortadan kalktığında ilk hâline dönebilen malzemeler olarak tanımlanmıştır [41]. Daha sonraki yıllarda Culshaw (1996), Gandhi ve Thompson (1992) gibi araştırmacılar, AM’ in yalnızca sensör–aktüatör yapılarından ibaret olmadığını; aynı zamanda entegre geri besleme (feedback) mekanizmalarıyla birlikte çalıştığında akıllı yapıların (smart structures) temel bileşeni haline geldiğini vurgulamıştır [42], [43]. Bu bakış açısına göre AM, bir yapının yalnızca statik bir bileşeni değil, aynı zamanda çevresel koşullara uyum sağlayan dinamik bir alt sistemi olarak değerlendirilir.

Literatürde AM’ in çok çeşitli tanımları olmakla birlikte, tüm yaklaşımlar ortak bir kabul üzerinde birleşmektedir: AM, çevresel bir değişimi algılayan, bu algıyı dönüştürerek tepki üreten, gerektiğinde şekil veya faz değiştirebilen ve uyarı ortadan kalktığında başlangıç konfigürasyonuna dönebilen aktif fonksiyonel malzemelerdir [44], [45]. Bu nedenle modern mühendislik uygulamalarında, özellikle enerji verimliliği, titreşim kontrolü, robotik sistemler, biyomedikal cihazlar, uçak kanatları, mikro-aktüatörler ve sensör sistemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır.

AM’ in bir diğer önemli özelliği, uyarlanabilirlik (adaptiveness) yeteneğidir. Bu malzemeler, yalnızca bir uyarıya tepki vermekle kalmaz, aynı zamanda bu tepkinin şiddetini, hızını ve türünü sistem tasarımına bağlı olarak değiştirebilir. Örneğin ŞHA, sıcaklık veya gerilme etkisiyle martensit–östenit dönüşümü gerçekleştirerek şekil değiştirir; piezoelektrik malzemeler, mekanik yük altında elektrik yükü üretir veya elektrik alan altında deformasyon oluşturur; magnetostriktif malzemeler manyetik alan değişimlerine hızlı tepki

verir. Bu çeşitlilik, akıllı malzemeleri diğer tüm fonksiyonel malzeme türlerinden ayıran başlıca üstünlüktür [43], [46].

AM' in mühendislikte kullanım alanlarının giderek artmasının temel nedeni, sistemlere yüksek hassasiyet, düşük enerji tüketimi, kompakt tasarım, daha hızlı tepki süreleri ve uzun süreli kararlılık kazandırmalarıdır. Günümüzde pek çok modern uygulama örneğin uzay araçlarında adaptif yüzeyler, protezlerde biyomimetik hareket mekanizmaları, MEMS tabanlı mikro-sensörler, değişken sertlik gösteren robotik eklemler, titreşim sönümleme panelleri ve aktif kontrol yüzeyleri bu malzemelerin gelişimi sayesinde mümkün hâle gelmiştir.

Özetle AM, yalnızca pasif bir yapısal eleman olmaktan çıkarak kendi kendini algılayabilen, çevresel uyarılara tepki verebilen ve uyaran ortadan kalktığında başlangıç hâline dönebilen gelişmiş mühendislik malzemeleridir. İlk sistematik tanımı Roger tarafından 1988 yılında yapılan bu malzeme sınıfı, daha sonraki yıllarda Culshaw (1996), Gandhi & Thompson (1992), Otsuka & Wayman (1998) ve Liu (2006) gibi araştırmacılar tarafından detaylı biçimde incelenmiş ve özellikle mekatronik, robotik ve ileri imalat teknolojilerinde vazgeçilmez bir tasarım bileşeni hâline gelmiştir [41],[46]. Bu bağlamda AM, günümüz teknolojisinde olduğu kadar geleceğin adaptif mühendislik çözümlerinde de stratejik bir öneme sahiptir.

2.1.1. Akıllı malzemelerin sınıflandırılması ve uygulama alanları

AM, gösterdikleri fiziksel tepki mekanizmalarına ve işlevsel özelliklerine göre çeşitli alt sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma, malzemenin hangi tür uyarana tepki verdiğini, hangi uygulama alanlarına uygun olduğunu ve sistem tasarımında nasıl bir rol üstlendiğini belirlemek açısından kritik öneme sahiptir [41], [42].

AM' in uygulama alanları, yüksek tepki hızı, düşük enerji tüketimi ve fonksiyonel çeşitlilik gibi avantajları sayesinde her geçen yıl daha da genişlemektedir. Uçak kanatlarının adaptif kontrolünden medikal implantlara, mikro-aktüatörlerden optik sensörlere kadar pek çok ileri teknoloji sisteminin temelini bu malzemeler oluşturmaktadır. Bu nedenle AM, modern mühendislikte sensör-aktüatör bütünlüğünü sağlayan stratejik bileşenlerdir.

Literatürde akıllı malzemeler genel olarak sensör, aktüatör ve adaptif malzeme davranışı göz önüne alınarak aşağıdaki başlıca kategorilerde incelenmektedir:

Ni-Ti, CuZnAl, CuAlNi gibi alaşımlardan oluşan ŞHA; sıcaklık, dış yük veya manyetik alan gibi uyaranlara bağlı olarak faz dönüşümü (martensit–östenit) gerçekleştirir ve bu dönüşüm sonucunda özgün şekillerine geri dönebilirler [46], [47].

Uygulama alanları:

- Aktüatörler,
- Mikro-robotik sistemler,
- Tıbbi stentler, ortodontik teller,
- Titreşim sönümleyiciler,
- Uydu kanat mekanizmaları.

Şekil hafızalı polimerler (shape memory polymers – SMP), termal, ışık veya pH gibi uyaranlarla programlanabilir şekil değişimi gösterebilen, hafif ve düşük maliyetli akıllı polimerlerdir. Polimer ağ yapısındaki geçici ve kalıcı bağlar, uyarı ortadan kalktığında polimerin eski formuna dönmesini sağlar [41].

Uygulama alanları:

- Biyomedikal implantlar,
- Akıllı paketleme teknolojileri,
- Yumuşak robotik sistemler,
- Öz uyumlu yüzeyler.

Elektrostatif ve elektrodinamik malzemeler elektrik alan etkisiyle deformasyon, yer değiştirme veya yüzey değişimi oluşturur. Dielektrik elastomerler bu grubun en yaygın kullanılan üyeleridir [42], [46].

Uygulama alanları:

- Yüksek esneklikte aktüatörler,
- Yapay kas sistemleri,
- Optik yüzey kontrol sistemleri

Kromik malzemeler, ışık (foto-kromik), sıcaklık (termo-kromik), elektrik (elektro-kromik) veya kimyasal ortam değişimine bağlı olarak renk ve optik özelliklerini değiştirebilirler [46].

Uygulama alanları:

- Akıllı cam sistemleri,
- Giyilebilir elektronikler,
- Güvenlik baskıları,
- Optik sensörler.

Elektrostatif ve elektrodinamik malzemeler, elektrik veya manyetik alan altında viskozite değiştirerek akış özelliklerini kontrol edilebilir hâle getirirler. Alan uygulandığında sıvının akış direnci milisaniyeler içinde değişir [42].

Uygulama alanları:

- Adaptif sönümleyici sistemler,
- Otomotiv süspansiyonları,
- Vibrasyon kontrol sistemleri.

Magnetostriktif malzemeler, uygulanan manyetik alan altında boyutsal değişim gösterir ve bu özellikleri sayesinde yüksek hassasiyet gerektiren aktüatör uygulamalarında kullanılır. Terfenol-D en bilinen örnektir [41], [46].

Uygulama alanları:

- Hassas konumlama aktüatörleri,
- Ultrasonik cihazlar,
- Titreşim kontrol sistemleri,
- Enerji dönüştürücüler.

3. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

3.1. Şekil Hafızalı Alaşımların Tarihcesi

Aden Martens 1890' larda çelik alaşımların mikroyapısında martenziti keşfetti. Bununla beraber 1900'larda martenzit konusunda çalışmalar yoğunlaşmış ve Fe-C sisteminde martenzitik dönüşüm geri dönüşümsüz olarak kabul görmüştür. Martenzitik dönüşümün geri dönüşümlü olduğunu açıklayan termoelastik martenzitik kavramını 1949 yılında CuZn ve CuAl alaşımlar üzerine çalışan Kurdjumov ve Khandros tarafından keşfetilmiştir [32].

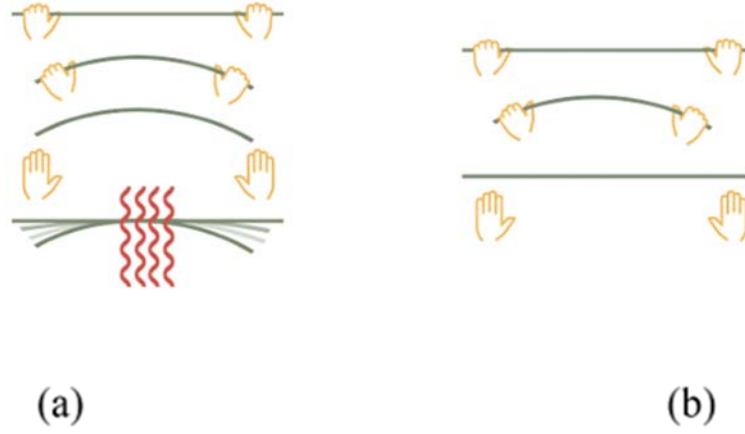
ŞHE ilk A. ÖLANDER tarafından 1932' de Au-Cd alaşımında suni olarak elastik davranışını keşfetti. Greninger ve Mooradian 1938' de Cu-Zn alaşımında sıcaklığın artıp azalmasıyla martenzitik fazın oluşup kaybolduğunu keşfetti. Buhler ve arkadaşları (şekil 3.1) 1960' larda U.S. Naval Ordnance Laboratuvar'ında Ni-Ti alaşımları üzerine yaptığı çalışmada, eş atomlu Ni-Ti alaşımının ŞHE keşfetti [7].



Şekil 3.1 : William J. Buehler [7]

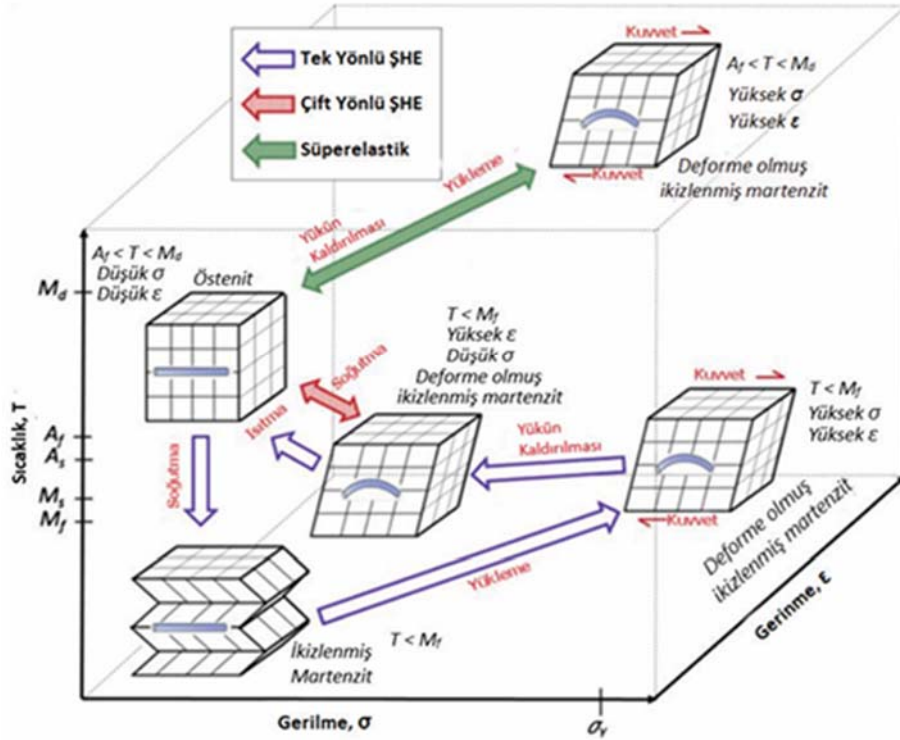
3.2. Şekil Hatırlama Etkisi

Şekil Hatırlama etkisi, birçok deformasyondan sonra bile ilk şekline dönme özelliğidir (Şekil 3.2). Sıcaklık değişimiyle mikroyapının değişiminin sonucu olan bu mekanizma, faz olarak martenzitik faz dönüşümüneyle gerçekleşir [32].



Şekil 3.2 : Şekil hafıza etkisi (a) ve eneklik (b) [25]

Bu mekanizma östenit ve martenzit faz dönüşümüyle meydana gelmektedir (Şekil 3.3). Yüksek sıcaklıklarda östenit fazı mevcutken düşük sıcaklıklarda martenzit fazı karalıdır. Östenit başlangıç sıcaklığı A_s bitiş sıcaklığı A_f , martenzit başlangıç sıcaklığı M_s ve bitiş sıcaklığı M_f ile gösterilir [17].



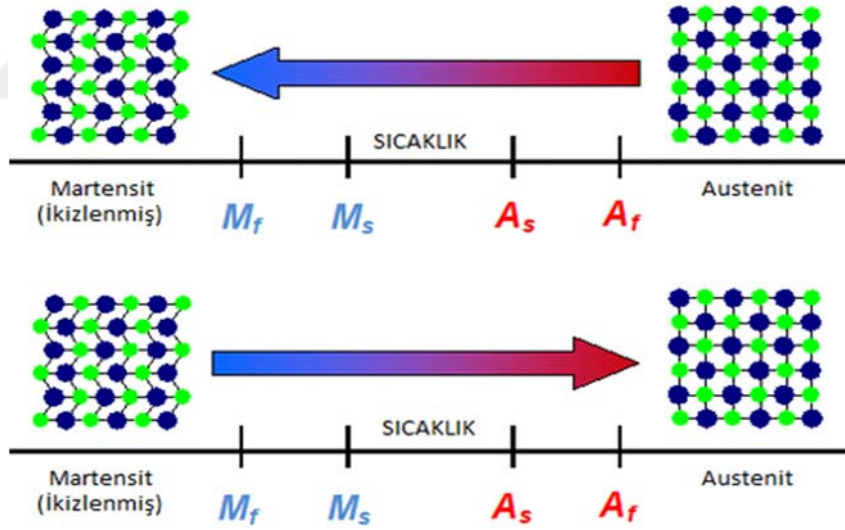
Şekil 3.3 : Sıcaklığa bağlı ŞHA'nın faz yapıları, fazların dönüşümleri [17]

M_f sıcaklığının altında mikroyapı martenzittir ve bu sıcaklı uygulanan deformasyon, martenzitik faz yapısının deformasyonudur. Ana faz olan östenik fazı, soğutulduğunda

ikizlenmiş martenzit fazına dönüşür. Bu ikizlenmiş martenzit fazına uygulana gerilme ile şekil değiştirilir. Gerilme kaldırıldığında ilk şekle dönemez ancak A_f sıcaklığına ısıtıldığında ilk şekle dönüşür. Bu deformasyon sonrası sıcaklık A_f sıcaklığının üstüne çıkarıldığında yapı östenit faza dönüşmekle beraber ilk şekline dönmektedir. ŞHA da hafıza mekanizması tek yönlü şekil hatırlama, çift yönlü şekil hatırlama ve SE olmak üzere 3 gruba ayrılır [21].

3.2.1. Martenzit faz dönüşüm

Mikroyapıda faz dönüşümleri difüzyonsuz ve difüzyonlu olmak üzere iki gruba ayrılır. Difüzyonsuz faz dönüşümleri yüksek sıcaklıkta farklı bir kristal kafes yapıdayken, soğuma esnasında daha düşük enerjili kristal kafes yapısına dönüşmesidir ve kafes parametresindeki atomlar sabittir[5]. Martenzit difüzyonsuz faz dönüşümüne sahiptir ve iki gruba ayrılır. Termoelastik martenzitik ve termoelastik olmayan martenzittir [12]. Termoelastik martenzit fazı, düşük sıcaklıklarda martenzit fazı olarak karalıyken yüksek sıcaklıklara çıkıldığında yerini tamamen östenit fazına bırakarak termal olarak tersinir olma özelliğindedir. Bu durumun gösterimi Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4 : Sıcaklık ile meydana gelen östenit- martenzit faz dönüşümünün şematik gösterimi [2]

Martenzitik dönüşüm, ŞHA da “ikizlenme” mekanizmasıyla gerçekleşirken, Demir – Karbon alaşımında “kaynama” mekanizmasıyla gerçekleşmektedir. Martenzitik faz, Demir – Karbon alaşımlarında sıcaklığa bağlı hızlı soğumala hızlarında oluşan reaksiyon ürünüykeni

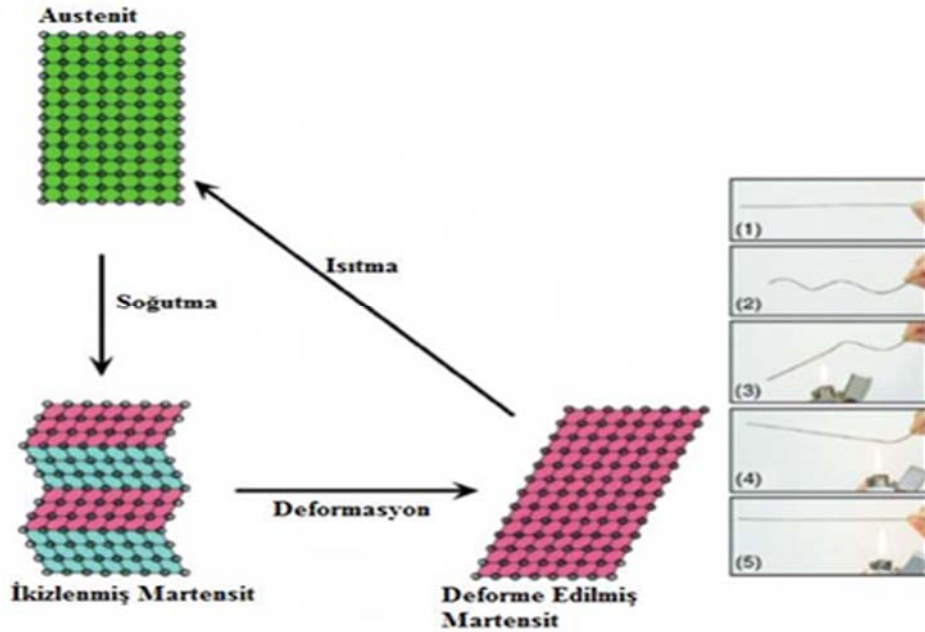
NiTi, NiCoAl, ZnCuAl gibi ŞHA da kimyasal kompozisyon olarak sabit ve tersinir faz olarak bulunur (Şekil 3.5) [17].



Şekil 3.5 : Kayma (a) ve ikizlenme (b) mekanizmasının şematik gösterimi [12]

3.2.2. Tek yönlü şekil hafıza etkisi

Tek yönlü ŞHE, ŞH olayının en basit halidir. Alaşım M_f sıcaklıkta martenzit yapıdayken yük altında deformasyona uğradıktan sonra yük kaldırıldığında ilk haline dönemez. A_f sıcaklığının üstüne çıkıldığında deformasyona uğramadan önceki haline geri gelir. Sıcaklık tekrar M_f sıcaklığının altına düştüğünde deforma olmuş haline gelmez. Şekil 3.6 da verilen görüntü şekil hatırlama mekanizmasına tek yönlü şekil hafıza olayıdır [2].

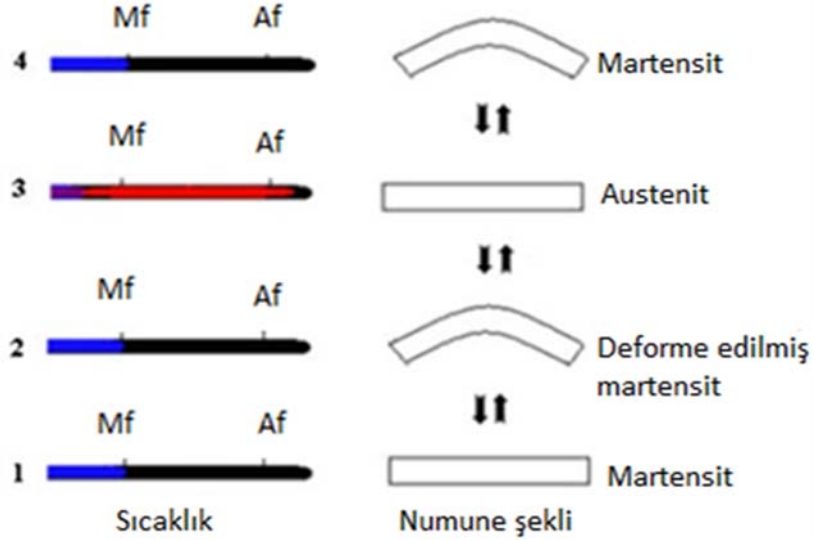


Şekil 3.6 : Tek yönlü şekil hafıza mekanizması [2]

3.2.3 Çift yönlü şekil hafıza etkisi

Çift yönlü şekil hafıza etkisi (ÇYŞHE), yüksek sıcaklıkta östenit yapıdaki şekli ile düşük sıcaklıkta martenzitik yapıdaki şeklini koruması ve bu koruma ile sıcaklık dönüşümlerinde düşük sıcaklık şekli ile düşük sıcaklık şekli arasındaki döngünün oluşması halidir [17].

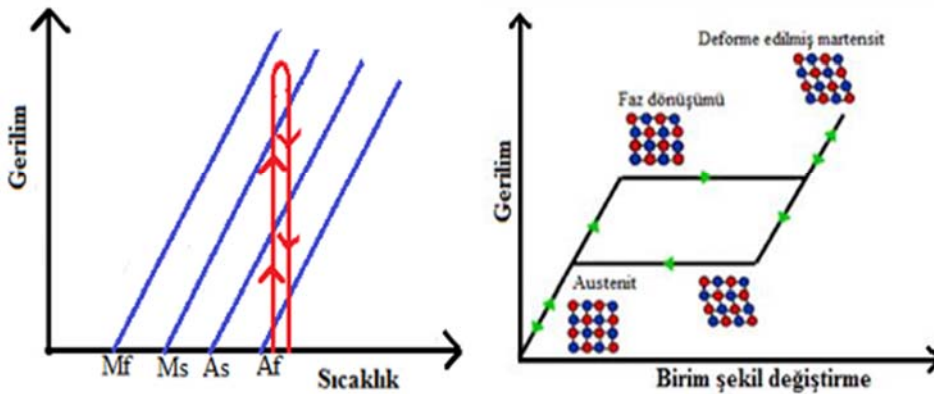
ŞHA'nın ÇYŞHE'i oluşturmak için eğitilmesi gerekmektedir. Bunlardan en çok yaygın olarak kullanılan yöntem ise ŞH döngüleri ile gerilme sonucu oluşmuş kayma etkisiyle oluşmuş martenzit oluşumudur [17]. Alaşım martenzitik fazda iken deformasyona uğratılıp ısıtılarak ilk şekline alır. Bu döngü 20-30 kez tekrarlandıktan sonra, ilk şeklini alıp soğutulduğunda tekrar deformasyon şeklini aldığı görülür (Şekil 3.7) [2].



Şekil 3.7 : Çift yönlü hafıza etkisinin sıcaklıkla değişimi [2]

3.3. Süperelastikiyet

ŞHA'nın önemli diğer özelliği suni elastik davranışdır. Bu davranış östenit bitiş sıcaklığının üzerinde yük uygulanıp deformasyona uğratıldığında mikroyapı östenit yapıdayken martenzite dönüşür ancak yük kaldırıldığında mikroyapı tekrar östenite yapıya dönüşerek elastik davranış göstererek ilk şekline dönüşür. Bu dönüşüme süperelastikiyet (sunî elastiklik) denir (Şekil 3.8). ŞHA da suni elastikiyet kalıcı şekil değişimi olmaktan yaklaşık %8 oranında şekil değişimine ve geri dönüşümüne olanak sağlar [2].

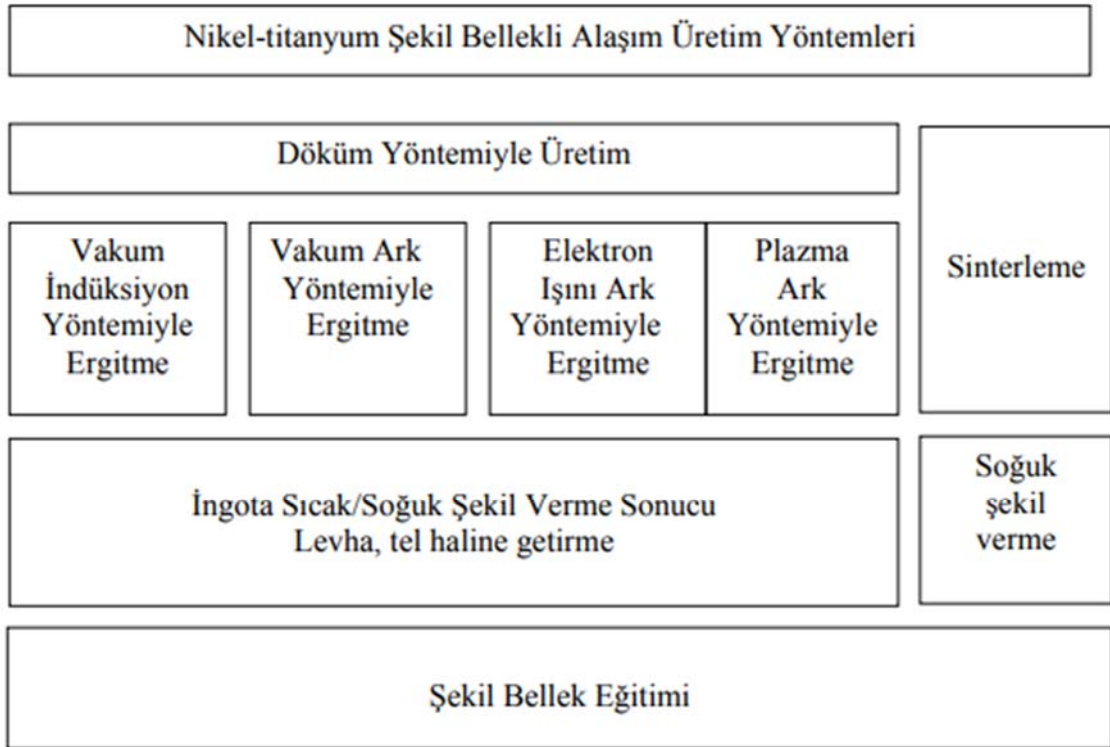


Şekil 3.8 : Süperelastik mekanizmasının şematik gösterimi [2]

3.4. Şekil Hafızalı Alaşımların Üretim Teknikleri

Titanyum elementi 900°C' den sonra oksijenle birleşik oluşturmaktadır. Bu durum alaşımını, mekanik özelliklerini ve mikroyapısını bozmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklık eritme proseslerinde (ark, plazma, lazer ve indüksiyon) oksijen ortamının oluşmaması için vakum yada koruyucu gaz atmosferi uygulanır [35]

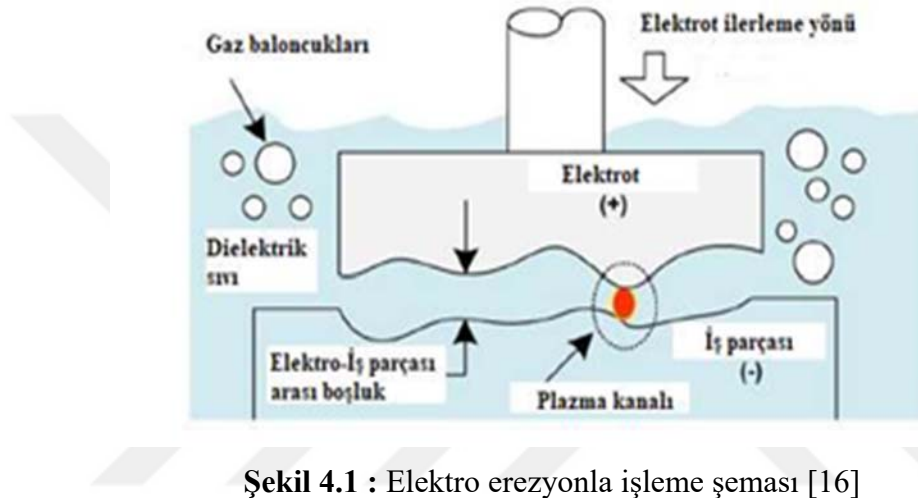
ŞHA üretim yöntemleri döküm, vakum altında eritme yada indüksiyonla eritme, toz metalurjisi, ve son zamanlarda katmanlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Üretilen külceler daha sonra plastik şekillenme yöntemiyle ve talaş kaldırma yöntemleriyle imal edilir (Şekil 3.9). Üretilen ŞHA'nın imalat yöntemi olan talaş kaldırma, bu alaşımlarda parça hasarına, yüksek maliyetlere, işleme zorluklarına gibi olumsuzluklara neden olduğundan klasik işleme yöntemlerinin haricinde yeni işleme yöntemlerini arayışına sebep olmuştur [35].



Şekil 3.9 : ŞHA'nın üretim teknikleri [35]

4. TEL EROZYON

ŞHA son yıllarda ŞH, SE, yüksek korozyon direnci, yorulma direnci ve biouyumluluk gibi üstün özellikleri nedeniyle bir çok kullanım alanı vardır. Ancak bu özelliklerinin yanında düşük ısıl iletkenlik, talaş kaldırmada zorluklar ve malzeme yüzeyinde gerilmeler klasik işleme yöntemlerinden başka imalat yöntemleri arayışına girmeye sebep olmuştur. Bu konuda elektro erozyon ile işleme yöntemleri ve tel erozyonla işleme yöntemleri (Şekil 4.1) yüzey formunu korumak, sert ve iletken olmayan malzemelerin işlenmesinde önemli rol oynamaktadır [16].



Tel erozyonla işleme yöntemi, iletken bir malzemeyi işlemek veya şekil vermek için kullanılan bir üretim tekniğidir. Bu yöntem programlanmış ince tel elektrotun işlenen malzemeden parçacık koparma işlemidir [48].

Tel erozyonda işlemenin temel prensibi, işlenen parça ile tel elektrod ile arasında ark oluşturarak malzemenin yüzeyinden parçacık almasıdır (Şekil 4.2). Oluşan arklar parçanın sertliğine bağlı olmadan sabit hızla aşınmasını sağlar. Bu teknikle işlemesi zor karışık şekiller hassas şekilde işlenebilir.

Tel erozyon işleminde kullanılan ekipmanlar;

- Tel bobini: Elektrod telinin sarıldığı bobindir.
- Tel besleme motoru: Tel bobininden telin ilerlemesini sağlayan motordur.
- Tel sürme motoru: Telin iş parçası üzerinde hareket etmesini sağlayan motordur.
- Kıvılcım jeneratörü: Tel ve iş parçası arasında kıvılcım oluşturmak için kullanılan cihazdır.
- Dielektrik sıvı: Tel ve iş parçası arasında yalıtım görevi gören sıvıdır.

Tel erozyon işleminin avantajları:

- Dar delikler açılabilir.
- Karmaşık şekillerin işlenmesi mümkündür.
- Hassas yüzey kalitesi elde edilebilir.

- İşlenmesi zor sert ve pahalı malzemeler işlenebilir.

Tel erozyon işleminin dezavantajları şunlardır:

- Elektrod teli sürekli aşındığından, maliyetli olabilir.
- İşlem sırasında yüksek voltaj ve akım kullanıldığı için, güvenlik önlemlerine dikkat edilmesi gerekir.

Tel erozyon yönteminin yaygın olarak kullanıldığı alanlar:

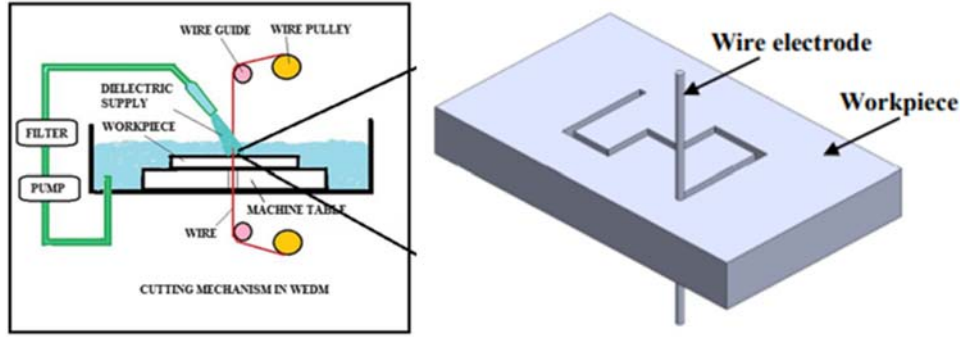
- Kalıp imalatı
- Elektronik komponent imalatı
- Tıbbi cihaz imalatı
- Uçak ve uzay sanayi

Sonuç olarak, tel erozyonla işleme yöntemi, karmaşık şekillerin, dar deliklerin hassas yüzey kalitesi isteyen iş parçalarının, çok sert ve pahalı malzemelerin işlenmesinde kullanılan bir işleme yöntemidir [48].

Tel erozyon ile işleme yöntemi, iş parçası ile tel elektrod arasında oluşan akımla, parça yüzünden parçacık koparma ve şekil verme işlemidir. Çalışma prensibi, şerit testere ile kontur keme işlemine benzemektedir. Şerit testere kontura temas ederek kesim yaparken, tel erozyon ile işleme yönteminde tel ile parça arasında akım ile oluşan ark ile gerçekleşmektedir [49].

Tel erozyon, havacılık, kalıp, otomotiv ve medikal sektörlerde karmaşık ve hasaas şekiller üretmek için kullanılan bir işleme yöntemidir. Bu özelliği sayesinde kullanımının arttığı gözlenmektedir [50].

Tel erozyon elektriksel iletkenliği olan malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır. Bu işlemin en önemli özellikleri talaşın tahliye hızı, yüzeyin hızlı soğutulması, yüzey pürüzlüğü ve kerf genişliğidir. Kerf, darbe akımı, iki darbe arası geçen süre, servo referans voltajı, tel hızı ile gerilimi ve enjeksiyon basıncı gibi parametrelere bağlıdır [50].



Şekil 4.2 : Tel erozyon işleme prosesi [50], [57]

Tel genellikle pirinç veya bakırdan yapılır ve çapı 0,1 ila 0,3 mm arasındadır. WEDM'de kullanılan dielektrik sıvı, yalnızca kıvılcım alanına püskürtülen deiyonize sudur.

Ekstrüzyon kalıpları ve kesme zimbaları çoğunlukla tel kesmeyle işlenir, çünkü kesme daima iş parçasının içinden geçer [51].

Tel erozyon, iletken yüksek mukavemetli malzemeleri işlemek için yaygın olarak kullanılan alışılmadık bir üretim sürecidir. Tel erozyon, karmaşık ve kompleks şekiller üretme konusunda iyi bir yöntemdir [52], [53]. Sürecin çok önemli işleme yanıtları; ideal talaş kaldırma oranı, bitmiş yüzeylerin ideal pürüzlülüğü ve çentik olan etkin kesme genişliğidir. Kerf, WEDM faaliyetlerinde kesme genişliği olarak belirtilir. Bu, iki darbe arasındaki boşluk süresi, tel ilerlemesi, servo voltajı, dielektrik sıvı basıncı ve tel gerginliği gibi kesme parametrelerine bağlıdır [52], [53]. WEDM, endüstrilerde yüksek mukavemet/ağırlık oranlı malzemelerin işlenmesi için geleneksel olmayan süreçlerden biridir. WEDM, havacılık ve tıp endüstrilerinde karmaşık şekiller üretmek için çok sayıda uygulamaya sahiptir. WEDM günümüzde her türlü elektriksel olarak iletken olan metalleri işleme kapasitesine sahiptir. Prosesin en önemli çıktıları MRR, Ra ve kerf'tir [50], [55].

WEDM'de MRR, Ra ve kerf gibi performans ölçümleri için önemli işleme parametrelerinin belirlenmesine yönelik teorik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Taguchi'nin deneysel tasarım yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda, WEDM parametreleri MRR'nin maksimize edilmesinde, Ra ve kerf'in minimize edilmesinde önemli rol oynamıştır [56].

5. MATERYAL VE METOT

5.1. Numune Üretimi

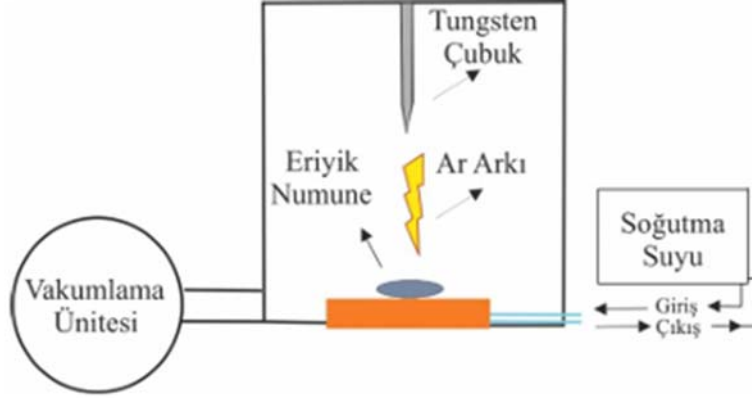
Bu çalışmada Ni-Ti ŞHA'nın işlenebilirliği arttırmak için, Si elementinin takviyesiyle mekanik özelliklerinin etkisi ve tel erozyonda işlenebilirliğini incelenmiştir. Literatür tarandığında bir çok alaşım elementi ile ŞHA'nın incelenmesi yapılmışken, Si elementiyle çalışma çok azdır.

Bu çalışmada, Ni₅₁Ti₄₉ alaşım matrisine farklı oranlarda Si (1, 2 ve 3 at.%) ilave edilerek hazırlanan numuneler, laboratuvar ölçekli ark eritme sistemi kullanılarak külçe formunda sentezlenmiştir. Numune üretiminde yüksek saflığa sahip (> %99) Ni, Ti ve Si elementel tozları tercih edilmiş, her bir kompozisyon için gerekli miktarlar hesaplanarak stokiometriye uygun şekilde tartılmıştır. Tartım sonrasında homojen bir başlangıç karışımı elde etmek amacıyla tozlar mekanik olarak iyice karıştırılmıştır.

Ark eritme işlemine geçmeden önce karışımlar, erime sırasında saçılmayı ve sistem elemanlarında hasarı önlemek adına yaklaşık 10 tonluk hidrolik pres kullanılarak pelet hâline getirilmiştir. Hazırlanan peletler, su soğutmalı bakır potaya yerleştirilmiş ve eritme işlemine uygun hâle getirilmiştir.

Eritme ünitesinin odacığı öncelikle 10⁻⁶ mbar seviyesine kadar vakumlanmış, ardından oksijen ve diğer gaz artıklarının uzaklaştırılması için yüksek saflıktaki argon gazı ile birkaç kez purge-vakum döngüsü uygulanmıştır. Sistemin inert atmosferde çalışma koşulları sağlandığında, odacık yaklaşık 700 mbar basınca kadar argon gazı ile doldurulmuş ve bu ortamda elektrot ile numune arasında iyonizasyon sağlanarak plazma oluşturulmuştur.

Ark oluşumu sonrası güç kaynağından geçirilen akım numune peletinin üzerine yönlendirilmiş ve Ni-Ti-Si karışımlarının tamamen ergimesi sağlanmıştır. Eritme sırasında ~80–170 A aralığında akım kullanılmış ve her bir numune en az üç kez çevrilerek yeniden ergitilmiş, böylece kimyasal homojenlik artırılmıştır.



Şekil 5.1 : Ark eritme sisteminin şematik gösterimi [33]



Şekil 5.2 : Akkor olana kadar eritilen numunenin fotoğrafı

Eritme işlemi sonrasında elde edilen $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49} + \text{Si}$ (1, 2, 3 at.%) alaşım külçeleri, herhangi bir kapsülleme uygulanmaksızın doğrudan tavlama işlemine alınmıştır. Numunelerin mikroyapısal düzenlenmesini sağlamak amacıyla külçeler 870°C sıcaklıkta 24 saat boyunca fırında tutulmuş ve tavlama sürecinin tamamlanmasının ardından oda sıcaklığına kontrollü biçimde soğutulmuştur. Tavlamayı takiben alaşımlarda çökeltili oluşumu ve faz kararlılığının optimize edilmesi amacıyla 500°C 'de 2 saat süreyle yaşlandırma (aging) uygulanmıştır. Bu iki aşamalı ısı işlem, numunelerin homojenlik, faz dengesi ve mikroyapısal stabilite açısından karakterizasyon çalışmalarına uygun hâle getirilmesini sağlamıştır. Bu süreç sonunda, $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49} + \text{Si}$ (1, 2, 3 at.%) kompozisyonlarına sahip alaşımlar mekanik ve yapısal karakterizasyonlara hazır hâle getirilmiştir. Numuneler, M0 referans numunesi, M1 %1 Si, M2 %2 Si ve M3 %3 Si içeren numuneler etiketlenmiştir.

5.2. X Işını Kırınımı Analizleri (XRD)

Üretilen $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49} + \text{Si}$ (1, 2, 3 at.%) alaşımlarının oda sıcaklığındaki faz yapıları, X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile karakterize edilmiştir. XRD tekniği, kristal yapılardan saçılan X-ışınlarının Bragg yasası ile tanımlanan koşulları sağlaması prensibine dayanır. Kaynaktan çıkan monokromatik X-ışınları numune üzerinden difraksiyona uğratılmış,

saçılan ışınların şiddet bilgisi dedektör aracılığıyla toplanarak bilgisayar ortamında işlenmiştir.

Bu çalışma kapsamında tüm kırınım ölçümleri Rigaku Miniflex 600 model bilgisayar kontrollü difraktometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde Cu K α radyasyonu ($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$) kullanılmış; tarama aralığı $2\theta = 30^\circ\text{--}80^\circ$, tarama hızı ise $3^\circ/\text{dak}$ olarak seçilmiştir. Elde edilen kırınım desenleri literatür verileriyle karşılaştırılarak faz tayini yapılmış ve farklı Si katkı oranlarının kristal yapı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

5.3. Metallografik Hazırlama İşlemleri

Numuneler, mikroyapı ve elementel dağılım analizleri yapılmadan önce metalografik olarak hazırlanmıştır. Öncelikle örnekler soğuk bakalite alınmış ve daha sonra otomatik zımparalama sisteminde çok kademeli bir aşındırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada METKON FORCIPOL-2 cihazı kullanılmış ve sırasıyla 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 mesh zımpara kâğıtları uygulanmıştır. Bu kademeli aşındırma işlemi yüzeydeki deformasyon tabakasının kontrollü şekilde uzaklaştırılmasını sağlamıştır.

Zımparalama uygulamasının ardından çuha diski ve elmas pasta kullanılarak yüzeyler ayna parlaklığına getirilmiştir. Parlatma sonrası mikroyapının açıkça görülebilmesi için dağlama işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde HNO_3 (%5) + HF (%10) + H_2O (%85) içeren dağlayıcı çözelti tercih edilmiş ve numuneler bu çözelti içerisinde 10 saniye bekletilmiştir. Uygulanan dağlama prosedürü Ni-Ti tabanlı alaşımların martensitik plakaları, tane sınırlarını ve Si katkısından kaynaklanan lokal kimyasal zenginleşme bölgelerini görünür hale getirmektedir. Dağlama sonrası yüzeyler saf su ve etanol ile temizlenerek kurutulmuştur.

5.4. Enerji Dağılımlı X-Işınları (EDX) ve Elementel Haritalama (Mapping) Analizleri

Numunelerin kimyasal bileşimlerinin doğrulanması ve elementlerin alaşım içindeki dağılımlarının belirlenmesi amacıyla EDX ve elementel haritalama analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sayesinde hem üretim aşamasındaki stokiyometrinin korunup korunmadığı hem de tavlama ve yaşlandırma işlemlerinin element dağılımı üzerinde oluşturduğu etkiler değerlendirilmiştir.

EDX analizleri sırasında elde edilen spektrumlar üzerinden Ni, Ti ve Si elementlerine ait atom yüzdeleri hesaplanmış ve hedef kompozisyonlarla karşılaştırılmıştır. Böylece numunelerdeki olası buharlaşma, difüzyon ya da segregasyon kaynaklı sapmalar tespit

edilmiştir. Buna ek olarak, elementel haritalama (mapping) ile her bir elementin yüzey boyunca dağılımı uzaysal olarak görüntülenmiş; Si katkısının alaşım içerisinde homojen dağılması veya belirli bölgelerde yoğunlaşma eğilimi gösterip göstermediği incelenmiştir.

Analizlerin tamamı Jeol JSM-7001F model taramalı elektron mikroskobu üzerinde bulunan EDX sistemi kullanılarak yapılmıştır. Element haritaları yüksek çözünürlüklü tarama koşullarında elde edilmiş, sonuçlar numunelerin mikroyapısal bütünlüğü açısından değerlendirilmiştir.

5.5. Optik Mikroskop Analizleri

Hazırlanan Ni–Ti–Si alaşım örneklerinin mikroyapısal karakterizasyonu, yüzey hazırlığı sonrası optik mikroskop (OM) incelemeleri ile gerçekleştirilmiştir. Numuneler önce sıcak montaj ile sabitlenmiş, ardından metalografik standartlara uygun şekilde aşındırıcı kademeleri 180–2500 mesh arasında değişen SiC zımparalarla düzleştirilmiştir. Sonrasında 1 µm ve 0.3 µm alumina süspansiyonu kullanılarak keçe ped üzerinde parlatma yapılmıştır. Nihai parlatma adımının ardından yüzeyler, literatürde Ni-Ti-Si temelli ŞHA’ı için yaygın olarak kullanılan uygun kimyasal dağlayıcı ile dağlanmış ve martensitik varyantların, ikiz sınırlarının ve olası tane içi modülasyonların ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Elde edilen OM görüntüleri sayesinde, çökeltme veya tavlama sonrası mikroyapısal homojenlik, tane boyutu dağılımı ve faz morfolojilerindeki değişimler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; özellikle Si katkısının mikroyapı üzerindeki etkisini belirleyen görsel kanıtlar elde edilmiştir.

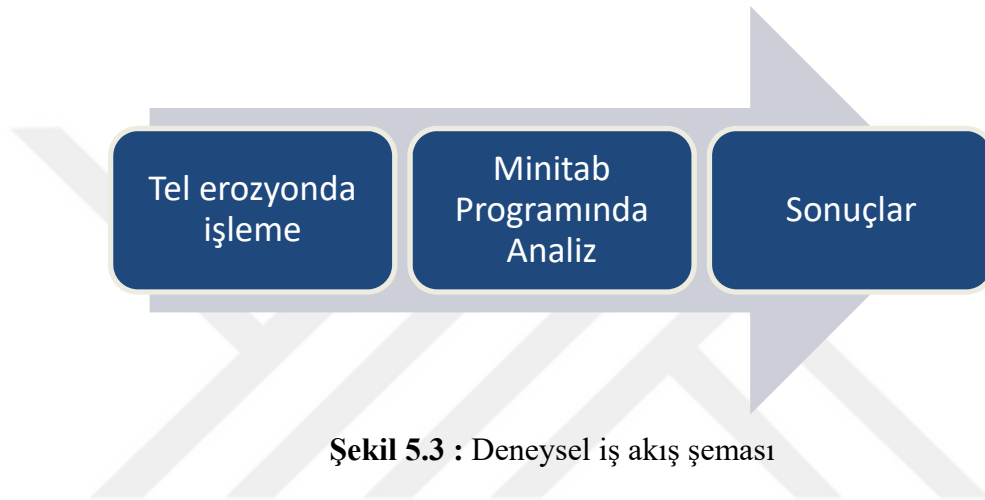
5.6. Tel Erozyon İle İşlenebilirlik

Alaşım numunelerinin mekanik işlenebilirlik özelliklerini incelemek ve deneysel karakterizasyon için gerekli boyutlandırılmış örnekleri elde etmek amacıyla, yüksek hassasiyetli tel erozyon (Wire Electrical Discharge Machining-WEDM) yöntemi kullanılmıştır ve iş akışı Şekil 5.3’de veirilmiştir. Çalışmalarda ONA AF25 marka ve model CNC tel erozyon tezgâhı kullanılmıştır (Şekil 5.4). Kesme prosesi boyunca takım elektrodu olarak 250 µm çapında pirinç tel kullanılmıştır. Pirinç telin tercih edilme nedeni; yüksek elektriksel iletkenliği, iyi termal kararlılığı ve kıvılcım oluşumu sırasında stabil kopma davranışı sayesinde ince kesitli Ni–Ti–Si alaşımlarında yüzey bütünlüğünü korumasıdır. Dielektrik ortam olarak klasik deiyonize su kullanılmıştır. Bu sıvı yüksek viskoziteye sahip olduğundan, eriyik metal partiküllerinin çukurdan daha etkin uzaklaştırılmasını sağlar ve kıvılcım bölgesinde daha kararlı bir plazma kanalının oluşmasına katkı verir. Bu özellik,

özellikle martensitik yapıya sahip Ni-Ti-Si temelli alaşımların kesim sırasında yüzey hasarı (mikroçatlak, yeniden katılma kabuğu vb.) oluşmasını minimize eder.

Tüm bu parametreler ile yürütülen WEDM işlemleri sonucunda, numunelerin yüzey pürüzlülüğü, kesme genişliği kontrol edilmiş; böylece alaşımın hem işlenebilirlik performansı hem de ilerleyen ŞHÖ'nin korunumu ve yapısal karakterizasyon adımları için uygun örnek hazırlama koşulları optimize edilmiştir.

Tel erozyon tezgahında işlemenin ardından minitab programında analizler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.3 : Deneysel iş akış şeması



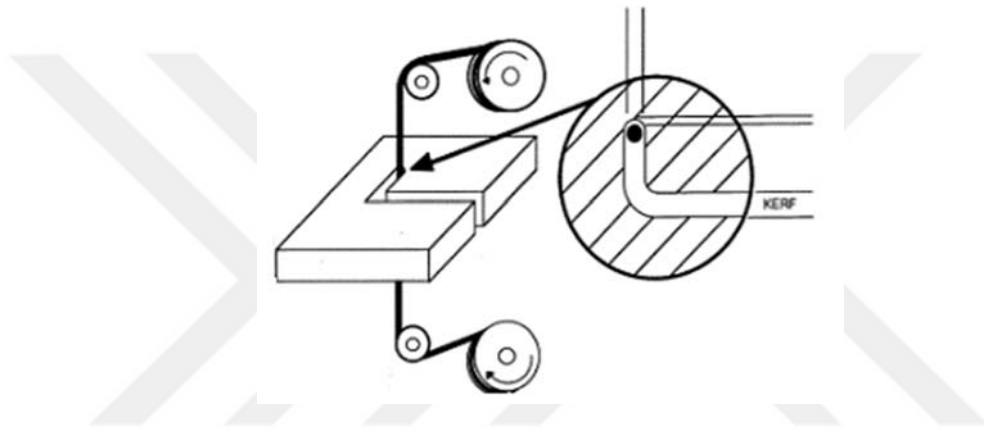
Şekil 5.4 : ONA AF25 marka ve model CNC tel erozyon tezgâhı ve kısımları

Çalışmalarda, doğrusal ve döndürerek kesim olmak üzere iki farklı kesme yöntemi uygulandı. Amaç bu yöntemlerin kesme genişliği (kerf) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkilerini ve farklılıklarını ortaya koymaktır. Yüzey pürüzlülük değerleri

Mitutoyo SJ 210 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Kerf değerleri ise LEICA DM4000M optik mikroskop cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

5.7. Kerf Genişliği

Tel erozyonla işleme sırasında işleme haassiyeti kerf genişliği (Şekil 5.5) ölçülerek nitelendirilir. Kesme, 12.0000C' e yakın bir sıcaklıkta yüksek yoğunluklu bir deşarj akımı darbesinden yaralanılarak yapılmaktadır. İş parçası anot ve kesme teli katot olarak kullanılır. Temizlik, soğutma sıvısı basınçlı bir şekilde verilir. Talaş kaldırma hızı kapasite ve kaliteyi önemli oranda etkiler. Bu hız birim sürede parçadan kaldırılan taş miktarıdır. Kerf genişliğide parça ile talaş kaldırma miktarı arasındaki bir parametredir [40].



Şekil 5.5 : Kerf genişliği [40]

5.8. Yüzey Pürüzlülüğü

Tel erozyonla talaş kaldırma işlemi, telin iş parçasına yüzeyine yüklü tel ile vurarak taşlaş kaldırma işlemidir. Bu işlem sırasında yüzeyde kraterler oluşur ve kraterlerin yoğunluğu ile deriğinli yüzey pürüzsüzlüğünü belirler. Bu durum voltaj artmasıyla yüzey pürüzsüzlüğü arasında doğru orantı varken talaş kaldırma hızıyla ters orantılıdır [17].

Çalışmada uygulanan L₁₆ Taguchi deney tasarımı ve deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kesme genişliği (kerf) değerleri çizelge 5.1.'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Çalışmada kullanılan parametreler ve seviyeleri

Parameters	Levels			
	1	2	3	4
Silisyum (%)	%0	%1	%2	%3
Time off (µs)	100	200	300	400
Dielectric (bar)	10	12	14	16
Wire feed (m/min)	4	6	8	10

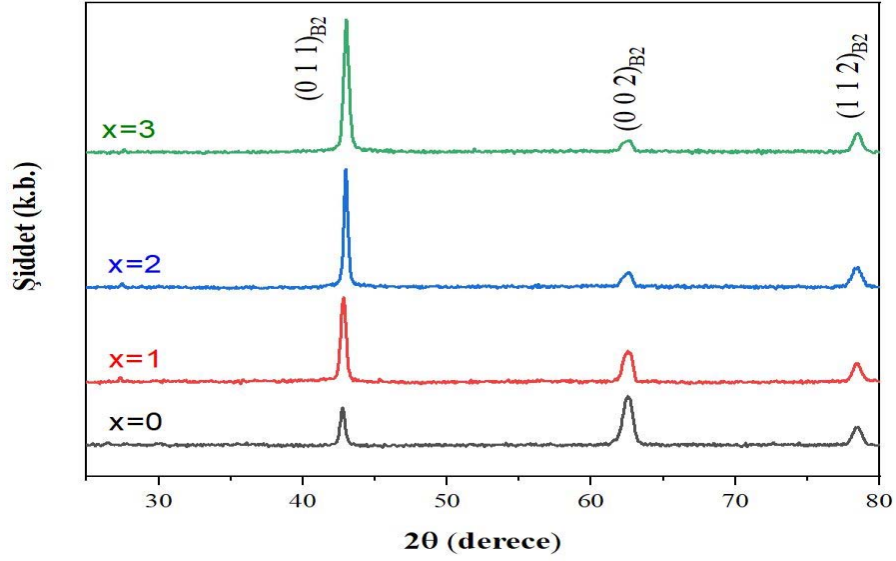
6. BULGULAR ve TARTIŞMA

Ni-Ti ŞHA; yüksek süneklik, faz dönüşümü davranışı ve ısılduyarlı mikroyapıları nedeniyle geleneksel işleme yöntemleri açısından zorluklar barındırmaktadır. Bu nedenle tel erozyon gibi temassız işleme yöntemleri, bu tür alaşımların hassas biçimde işlenmesi için uygun bir alternatif sunmaktadır. Bu çalışmada da alaşımlar tel erozyonda işlenmiş ve yenilikçi bulgular elde edilmiştir.

6.1. XRD Analiz Sonuçları

Bu çalışmada, Ni₅₂Ti₄₈ ŞHA'a Ni ve Ti atomik oranı korunacak şekilde sırasıyla %1, %2 ve %3 (atomik) Si ilavesi yapılmış ve elde edilen numunelerin oda sıcaklığındaki faz yapıları X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile ayrıntılı olarak incelenmiştir (Şekil 6.1). Ni-Ti esaslı alaşımlarda düşük oranlı alaşım elementlerinin faz kararlılığı, örgü parametreleri ve dönüşüm davranışları üzerinde belirgin etkiler oluşturabildiği bilinmektedir. Bu bağlamda, atomik yarıçapı Ni ve Ti'ye kıyasla daha küçük olan Si elementinin sisteme kontrollü bir şekilde ilave edilmesinin, kristal örgü üzerinde ölçülebilir değişimlere yol açması beklenmektedir.

Bu bölümün temel amaçları şu şekilde özetlenebilir: (i) oda sıcaklığında elde edilen XRD desenleri üzerinden faz analizinin yapılması, (ii) tüm numunelerin östenit fazda ve B2 düzenli kübik bir örgüde bulunduğunun gerekçelendirilmesi, (iii) özellikle $2\theta \approx 40-45^\circ$ aralığında gözlenen (011) yansımasına odaklanılarak birim hücre parametrelerinin hesaplanması, (iv) Si ilavesinin örgü parametresi üzerindeki etkisinin nicel ve nitel olarak ortaya konması ve (v) elde edilen yapısal sonuçların, ilerleyen bölümlerde tartışılacak dönüşüm ve fonksiyonel özellikler için bir altyapı oluşturmasının sağlanmasıdır.



Şekil 6.1 : Ni₅₂Ti₄₈ ve Si katkılı tüm numunelere ait oda sıcaklığında ölçülmüş XRD desenleri

Desenler incelendiğinde, tüm numunelerde yaklaşık $2\theta \approx 42-43^\circ$ civarında yoğun bir ana pik ile daha yüksek açılarda yer alan karakteristik kırınım piklerinin bulunduğu görülmektedir. Bu piklerin indekslenmesi sonucunda, söz konusu yansımaların B2 düzenli kübik östenit fazına ait olduğu belirlenmiştir.

Ni-Ti esaslı alaşımlarda B2 (CsCl tipi) kübik yapı, yüksek sıcaklık ve çoğu durumda oda sıcaklığı koşullarında kararlı olan östenit fazı temsil etmektedir. Martensitik dönüşüm sıcaklığının oda sıcaklığının altında kaldığı alaşımlarda, XRD desenlerinde yalnızca B2 fazına ait piklerin gözlenmesi beklenen bir durumdur. Bu çalışmada elde edilen XRD desenlerinde, martensit fazına özgü pik bölünmeleri, süper örgü yansımaları veya ek kırınım pikleri gözlenmemiştir. Bu bulgu, tüm numunelerin oda sıcaklığında östenit fazda bulunduğunu açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Ayrıca, Si ilavesi ile birlikte Ni-Si veya Ti-Si esaslı herhangi bir ikincil faza ait kırınım piklerinin ortaya çıkmaması, ilave edilen Si atomlarının büyük oranda Ni-Ti matrisi içerisinde çözüldüğünü ve mevcut B2 yapıyı koruduğunu göstermektedir. Bu durum, düşük oranlı Si ilavesinin faz saflığını bozmadığını ve katı çözelti şeklinde davrandığını ortaya koyması açısından önemlidir.

Birim hücre parametresinin hassas bir şekilde belirlenebilmesi için, yüksek şiddete sahip ve iyi tanımlanmış bir kırınım pikinin seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, çalışmada

tüm numunelerde net bir şekilde gözlenen ve yaklaşık $2\theta \approx 40-45^\circ$ aralığında yer alan B2 kübik yapıya ait (011) yansıması esas alınmıştır.

Kübik kristal sistemler için düzlemler arası mesafe (d) ile örgü parametresi (a) arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

XRD ölçümlerinden elde edilen 2θ değeri yardımıyla, Bragg yasası kullanılarak düzlemler arası mesafe hesaplanabilir:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Burada λ kullanılan X-ışınının dalga boyunu (Cu K α için $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), θ ise kırınım açısının yarısını ifade etmektedir. (011) düzlemi için $h^2 + k^2 + l^2 = 2$ olduğundan, hesaplanan d011 değeri doğrudan kübik örgü parametresinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Bu yaklaşım sayesinde, Si ilavesine bağlı olarak meydana gelen küçük pik konum değişimleri nicel olarak değerlendirilebilmekte ve örgü parametresindeki değişim güvenilir bir şekilde ortaya konabilmektedir.

XRD desenlerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi sonucunda, Si içeriği arttıkça (011) pikinin sistematik bir biçimde daha yüksek 2θ açılarına doğru kaydığı görülmektedir. Bragg yasası göz önüne alındığında, bu durum düzlemler arası mesafenin azalmasına ve dolayısıyla kübik örgü parametresinin küçülmesine işaret etmektedir.

Saf Ni₅₂Ti₄₈ alaşımı için hesaplanan örgü parametresi $a \approx 2.987 \text{ \AA}$ iken, Si içeriğinin %1, %2 ve %3 atomik oranlarına çıkarılmasıyla bu değer sırasıyla $2.982 \text{ \AA}$, $2.973 \text{ \AA}$ ve $2.970 \text{ \AA}$ olarak belirlenmiştir. Si ilavesiyle birlikte örgü parametresinde gözlenen bu sistematik azalma, Si atomunun Ni ve Ti atomlarına kıyasla daha küçük atomik yarıçapa sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir (Çizelge 6.1). Bragg yasası çerçevesinde değerlendirildiğinde, (011) pikinin daha yüksek 2θ açılarına kayması, düzlemler arası mesafenin ve dolayısıyla birim hücre boyutunun küçüldüğünü göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, Si atomlarının Ni-Ti matrisi içerisinde katı çözeltili şeklinde çözündüğünü ve B2 düzenli östenit fazının yapısal kararlılığını koruduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 6.1 : Silisyum içeriğiyle kırınım pikine dayalı olarak hesaplanan kübik örgü parametreleri

Si içeriği (x)	2 θ (°)	θ (°)	d_{011} (Å)	a (Å)
0	42.74	21.37	2.112	2.987
1	42.83	21.415	2.108	2.982
2	42.97	21.485	2.102	2.973
3	43.01	21.505	2.100	2.970

Bu eğilim, atomik boyut farkı temelinde açıklanabilir. Si atomunun atomik yarıçapı (~1.11 Å), Ni (~1.24 Å) ve Ti (~1.47 Å) atomlarına kıyasla daha küçüktür. Ni ve Ti oranı sabit tutularak sisteme Si eklenmesi, kristal örgü içerisinde lokal büzülmelere neden olmakta ve bu etki makroskopik ölçekte örgü parametresinde azalma olarak kendini göstermiştir.

6.2. EDX ve Elementel Mapping Analizleri

Bu çalışma kapsamında, X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ile elde edilen yapısal bulguların kimyasal bileşim ve elementel dağılım açısından doğrulanması amacıyla enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve elementel mapping analizleri gerçekleştirilmiştir. Özellikle Ni₅₂Ti₄₈ esaslı alaşıma atomik oran korunarak ilave edilen Si miktarının gerçekten hedeflenen şekilde arttığının ve alaşım matrisinde homojen bir dağılım sergilediğinin ortaya konması, faz analizlerinin güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

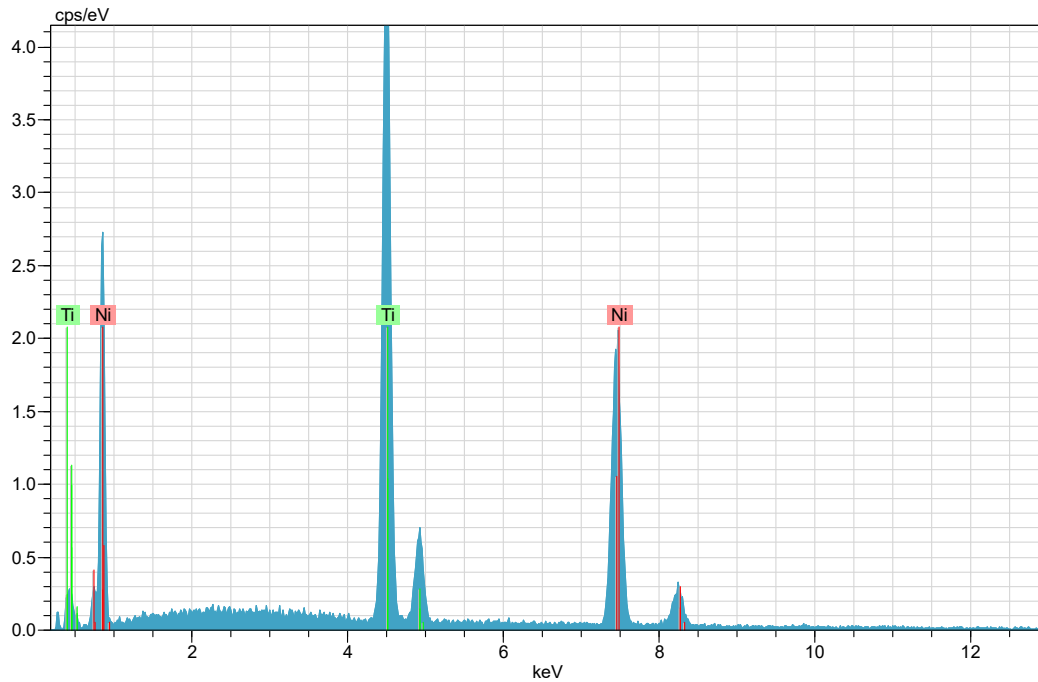
6.2.1. EDX noktasal analiz sonuçları

Üretilen Ni–Ti esaslı alaşımların kimyasal bileşimini doğrulamak ve artan Si katkısının matrise dahil olma durumunu incelemek amacıyla Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı Si içeriklerine sahip x=0, x=1, x=2 ve x=3 numunelerine ait EDX spektrumları ve kantitatif analiz sonuçları çizelge 6.2’ de verilmiştir. Analizlerde normalize edilmiş ağırlıkça yüzdeler (wt.%) ve atomik yüzdeler (at.%) dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır.

Çizelge 6.2 : Ortalama atomik yüzde değerleri

Numune Kodu	Ni (ağırlıkça %)	Ti (ağırlıkça %)	Si (ağırlıkça %)
x=0	52,66	47,34	-
x=1	51,79	46,52	1,69
x=2	51,32	46,39	2,59
x=3	49,01	48,97	2,66

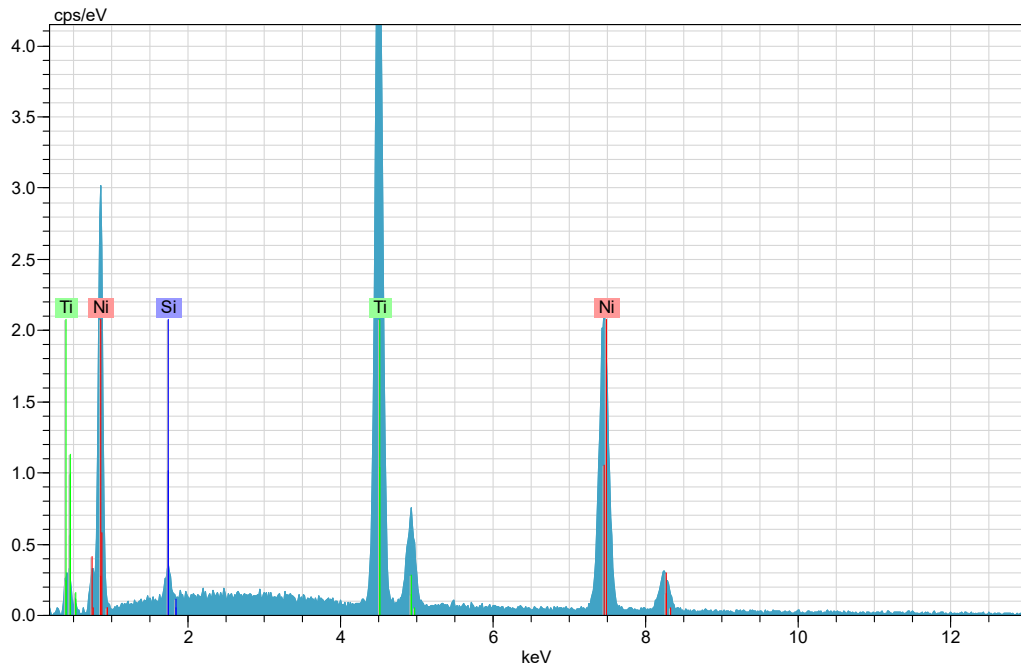
Si içermeyen referans numune olan $x=0$ 'a ait EDX spektrumunda yalnızca Ni ve Ti elementlerine ait karakteristik K-serisi pikleri gözlenmiştir (Şekil 6.2). Kantitatif analiz sonucunda normalize edilmiş ağırlıkça oranlar Ni için %56.12 wt., Ti için %43.88 wt. olarak belirlenirken, atomik yüzde cinsinden Ni %51.06 at. ve Ti %48.94 at. olarak hesaplanmıştır. Ni/Ti atomik oranının yaklaşık olarak 1'e yakın olması, alaşımın eş atomik Ni-Ti kompozisyonuna oldukça yakın olduğunu göstermektedir. Bu durum, alaşımın hedeflenen matrise uygun şekilde üretildiğini ve belirgin bir bileşim sapması bulunmadığını ortaya koymaktadır. Ölçüm hatalarının Ni için %1.7 ve Ti için %1.3 seviyesinde olması, elde edilen sonuçların güvenilirlik sınırları içerisinde olduğunu göstermektedir.



El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
			[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]	[%]
Ni	28	K-series	58.09	56.12	51.06	1.7
Ti	22	K-series	45.42	43.88	48.94	1.3
Total:			103.52	100.00	100.00	

Şekil 6.2 : $x=0$ numunesine ait EDX spektrumu ve normalize edilmiş ağırlıkça (wt.%) ile atomik yüzde (at.%) kompozisyon değerleri. Spektrumda yalnızca Ni ve Ti elementlerine ait karakteristik K-serisi pikleri gözlenmektedir.

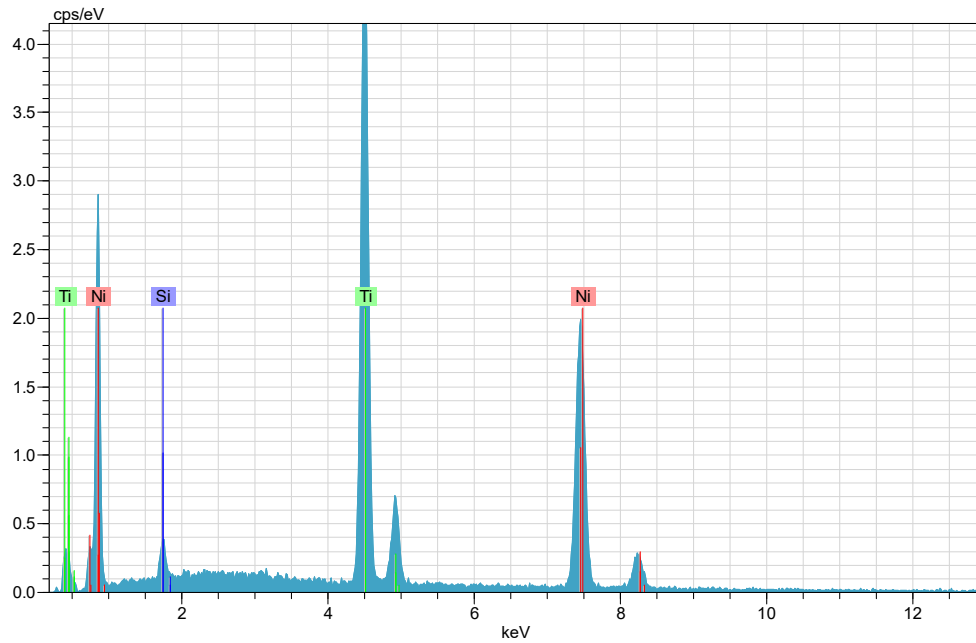
x=1 numunesinde, Ni ve Ti piklerine ek olarak Si elementine ait karakteristik piklerin ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 6.3). Normalize edilmiş ağırlıkça oranlar Ni %55.19 wt., Ti %43.78 wt. ve Si %1.03 wt. olarak belirlenmiştir. Atomik yüzde cinsinden ise Ni %49.71 at., Ti %48.35 at. ve Si %1.94 at. değerleri elde edilmiştir. Si ilavesiyle birlikte Ni atomik oranında belirgin bir azalma gözlenmiş olup, bu durum Si'nin matrise dahil olmasıyla birlikte bağ yapısında göreceli bir yeniden dağılım meydana geldiğini göstermektedir. Si'nin düşük atom ağırlığı nedeniyle ağırlıkça oranı sınırlı kalmakta, ancak atomik yüzde cinsinden daha belirgin bir katkı sunduğu görülmektedir. Bu durum, atomik düzeyde yapısal düzen üzerinde etkili olabilecek bir bileşim değişimini işaret etmektedir.



El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Ni	28	K-series	55.74	55.19	49.71	1.6
Ti	22	K-series	44.22	43.78	48.35	1.3
Si	14	K-series	1.04	1.03	1.94	0.1
Total:			101.00	100.00	100.00	

Şekil 6.3 : x=1 numunesine ait EDX spektrumu ve normalize edilmiş kompozisyon sonuçları. Ni ve Ti piklerine ek olarak Si elementine ait karakteristik piklerin ortaya çıktığı görülmektedir.

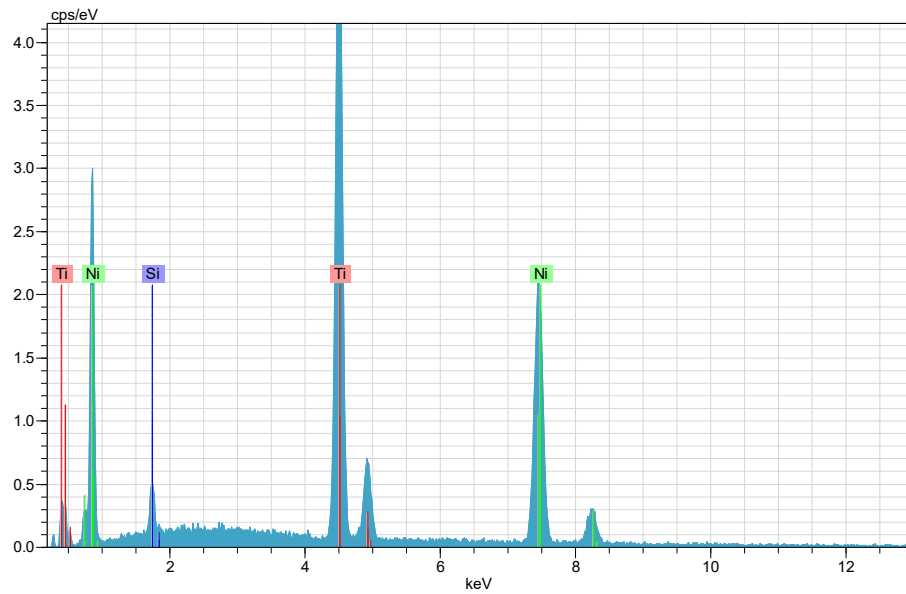
Si içeriğinin artırıldığı x=2 numunesinde EDX spektrumunda Si pik şiddetinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 6.4) . Normalize edilmiş ağırlıkça oranlar Ni %55.37 wt., Ti %43.16 wt. ve Si %1.47 wt. olarak belirlenmiştir. Atomik yüzde değerleri ise Ni %49.72 at., Ti %47.51 at. ve Si %2.77 at. şeklindedir. X=1 numunesine kıyasla Si atomik oranındaki artışın düzenli bir eğilim gösterdiği görülmektedir. Ni atomik oranı yaklaşık sabit kalırken Ti oranında hafif bir azalma söz konusudur. Bu durum, Si atomlarının kristal örgü içerisinde hem Ni hem de Ti alt örgülerine kısmi olarak yerleşebileceğini düşündürmektedir. Si'nin Ni ve Ti'ye kıyasla daha küçük atom yarıçapına sahip olması nedeniyle kristal örgü içerisinde lokal gerinim alanları oluşturması muhtemeldir. Bu tür gerinim alanları, faz dönüşüm davranışı ve mekanik özellikler üzerinde etkili olabilecek mikro-yapısal değişimlere zemin hazırlayabilir.



El	AN	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Error [%]
Ni	28	K-series	57.10	55.37	49.72	1.6
Ti	22	K-series	44.51	43.16	47.51	1.3
Si	14	K-series	1.52	1.47	2.77	0.1
Total:			103.13	100.00	100.00	

Şekil 6.4 : x=2 numunesine ait EDX spektrumu ve kantitatif elementel analiz sonuçları. Artan Si katkısına bağlı olarak Si pik şiddetinin yükseldiği gözlenmektedir.

En yüksek Si içeriğine sahip x=3 numunesinde Si piklerinin belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir (Şekil 6.5) . Normalize edilmiş ağırlıkça oranlar Ni %55.24 wt., Ti %42.94 wt. ve Si %1.82 wt. olarak hesaplanırken, atomik yüzde değerleri Ni %49.46 at., Ti %47.13 at. ve Si %3.41 at. olarak belirlenmiştir. X=0'dan X=3'e doğru ilerledikçe Si atomik oranının düzenli biçimde arttığı açıkça görülmektedir. Bu eğilim, üretim sürecinde Si katkısının kontrollü ve homojen şekilde matrise dahil edildiğini göstermektedir. Aynı zamanda Ni atomik oranında kademeli bir azalma eğilimi dikkat çekmektedir. Ni/Ti oranındaki bu değişim, Ni-Ti esaslı sistemlerde faz dönüşüm sıcaklıklarını ve martensitik dönüşüm davranışını etkileyebilecek önemli bir parametredir.



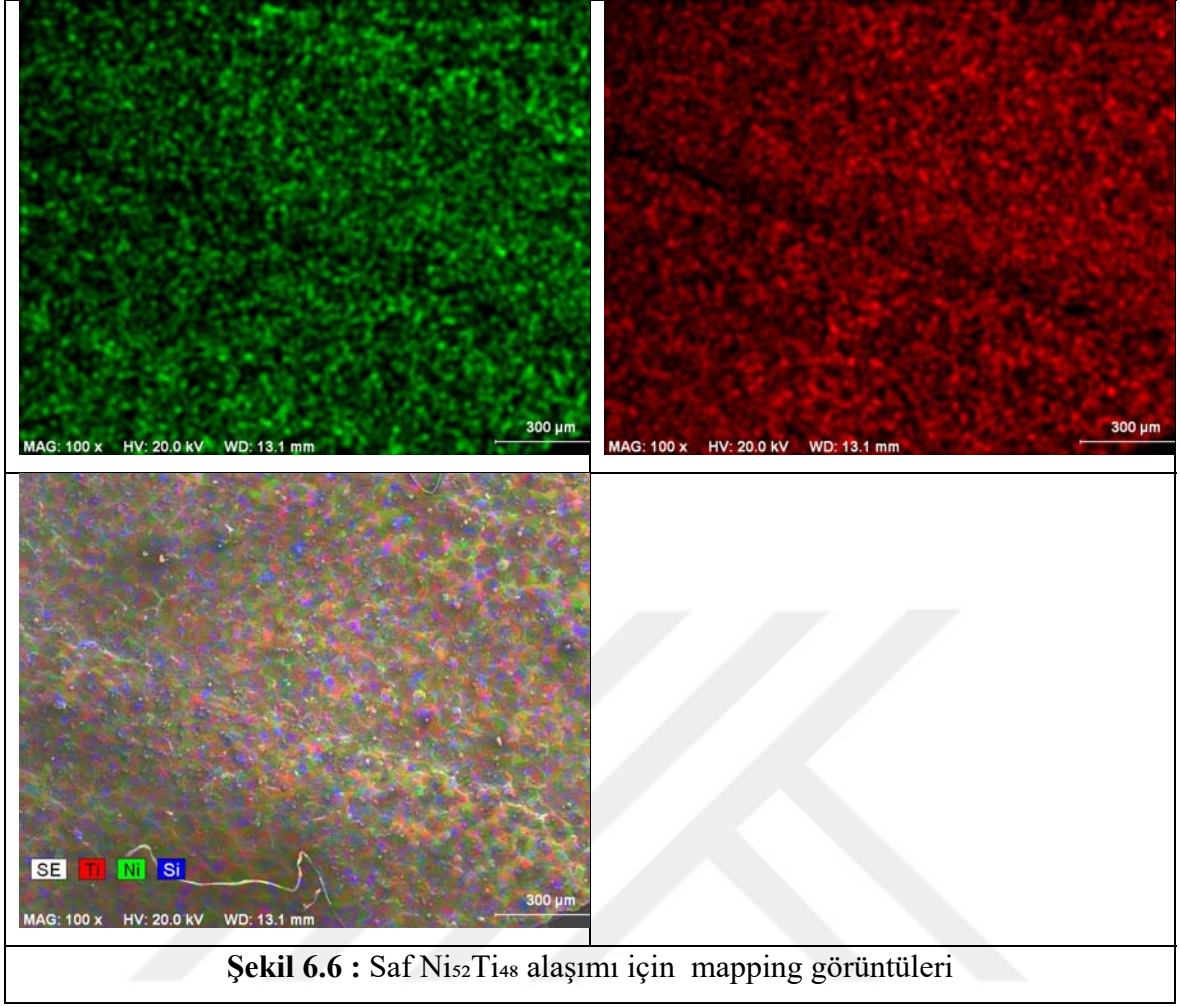
El	AN	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error
			[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]	[%]
Ni	28	K-series	56.98	55.24	49.46	1.6
Ti	22	K-series	44.29	42.94	47.13	1.3
Si	14	K-series	1.88	1.82	3.41	0.1
Total:			103.16	100.00	100.00	

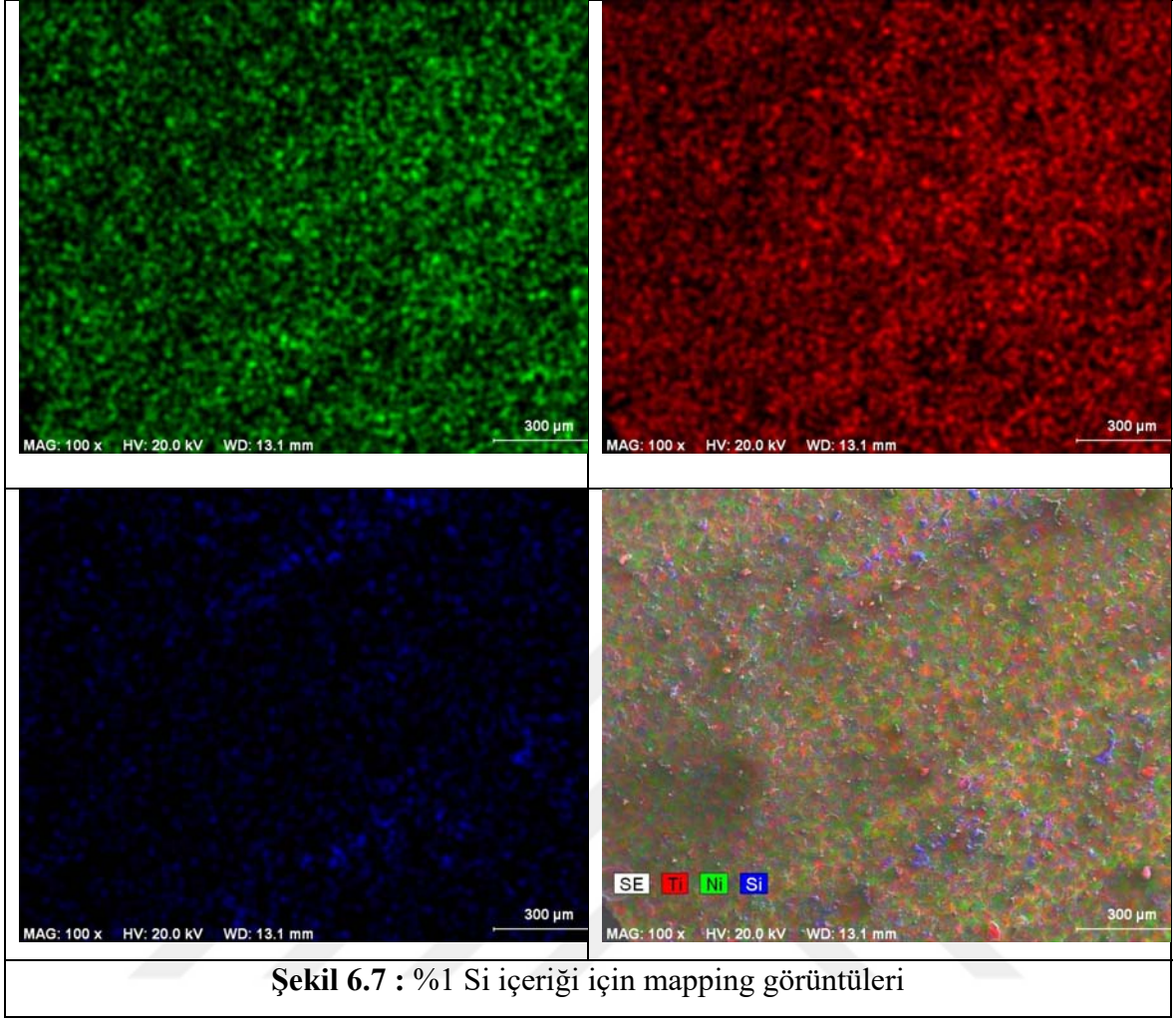
Şekil 6.5 : x=3 numunesine ait EDX spektrumu ve normalize edilmiş wt.% ve at.% değerleri. En yüksek Si içeriğine karşılık gelen spektrumda Si pik yoğunluğu belirgin şekilde artmıştır.

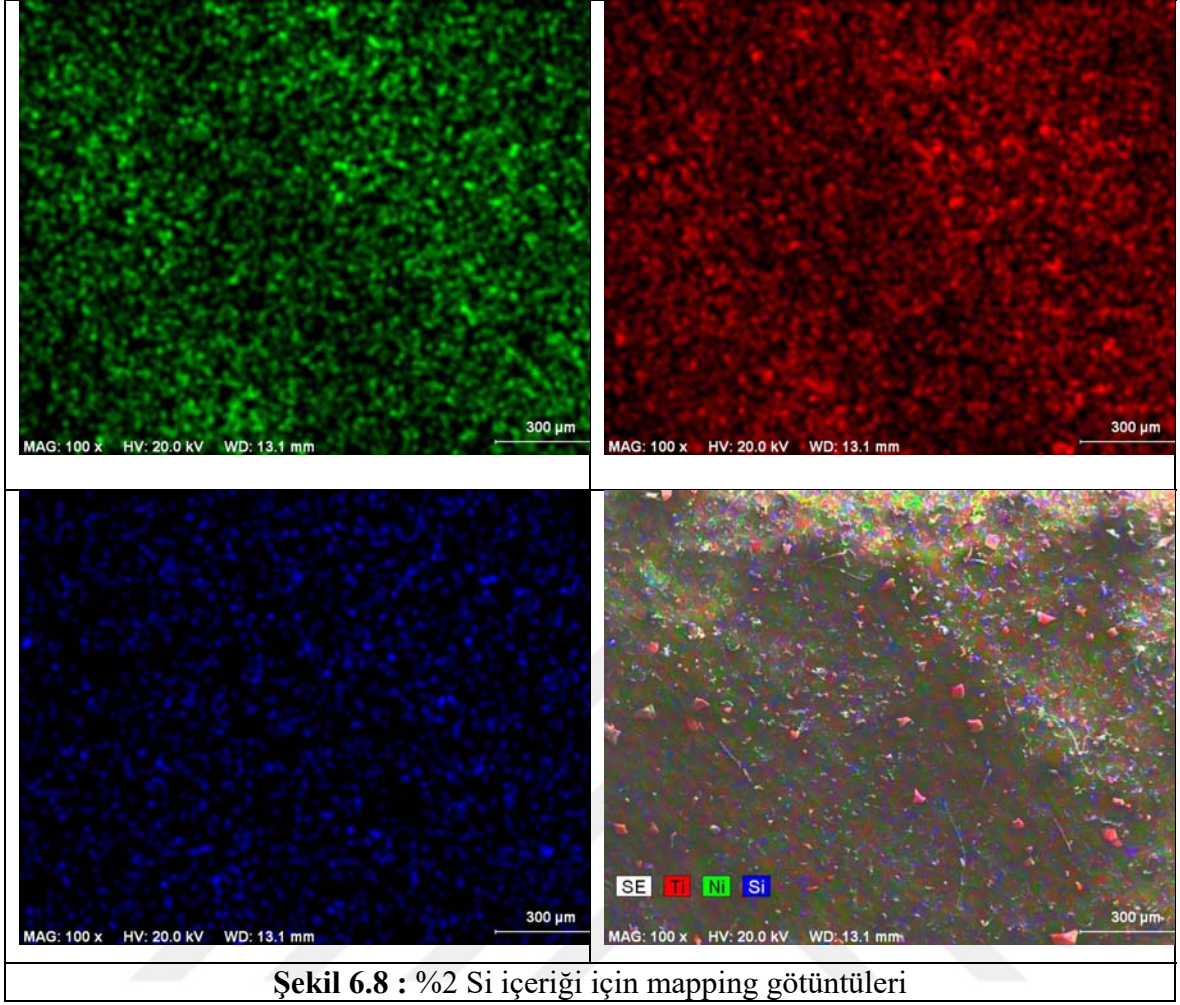
Genel olarak değerlendirildiğinde, EDX analiz sonuçları Si katkısının nominal kompozisyon artışıyla uyumlu biçimde matrise entegre edildiğini ortaya koymaktadır. Si miktarındaki artışa paralel olarak Ni atomik oranında gözlenen azalma, kristal örgü parametrelerinde ve bağ karakteristiğinde değişim oluşturabilecek potansiyel bir etkiyi işaret etmektedir. Bu kompozisyonel değişimin, ilerleyen bölümlerde tartışılacak olan faz analizi, dönüşüm davranışı ve mekanik özellik sonuçlarıyla birlikte ele alınması gerekmektedir. Elde edilen kimyasal analiz bulguları, alaşım sisteminde kontrollü kompozisyon değişiminin sağlandığını ve yapısal karakterizasyon sonuçlarıyla tutarlı bir eğilim sergilendiğini göstermektedir.

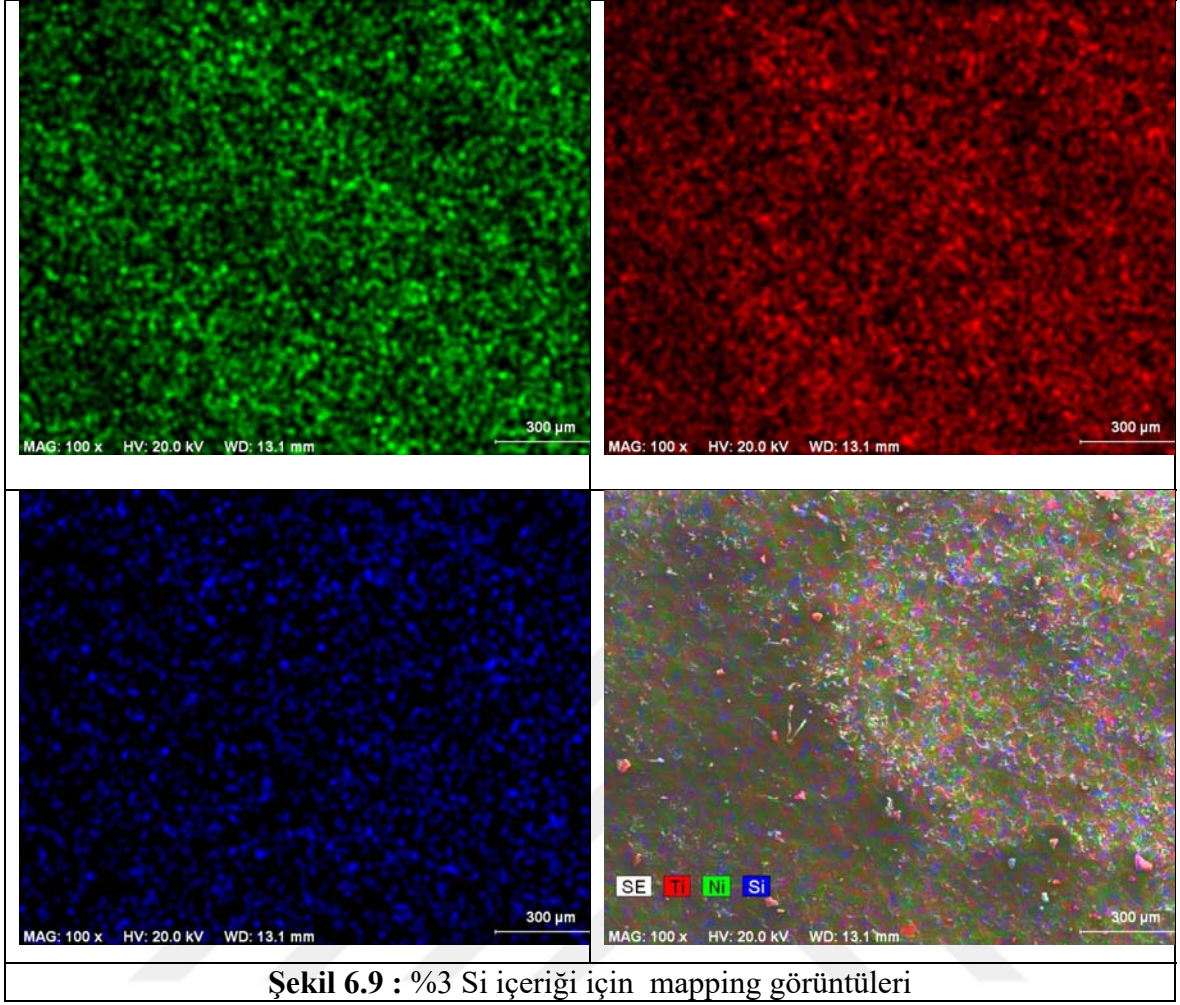
6.2.2. Elementel mapping analizleri

Numunelerin mikro yapısal ölçekteki elementel dağılımını incelemek amacıyla gerçekleştirilen elementel mapping analizleri, Ni, Ti ve Si elementlerinin tüm numune yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. Ana matris elementleri olan Ni ve Ti'nin dağılımlarının birbirleriyle örtüştüğü, Si elementinin ise bu matris içerisinde ayrışma (segregasyon) göstermeden uniform bir dağılım sergilediği açıkça görölmektedir (Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9).









Bu çalışmada Ni-Ti ŞHA'nın tel erozyon (WEDM) yöntemiyle işlenebilirliği kerf genişliği ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) kriterleri açısından deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Deneyler Taguchi deney tasarımı esas alınarak gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Tel erozyonda kesme sonrası parametrelerin elde edilen yüzey pürüzlülüğü, Kerf, değerleri incelenmiştir (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3 : Deney tasarımı ve sonuçlar

Silisyum (%)	Time off (µs)	Dielectric (bar)	Wire feed (m/min)	Ra (µm)	Kerf (µ)
1-saf	100	10	4	2,83	297
1-saf	200	12	6	2,86	301
1-saf	300	14	8	2,88	302
1-saf	400	16	10	2,66	291
2-%1	100	12	8	2,45	258
2-%1	200	10	10	2,47	259
2-%1	300	16	4	2,51	264
2-%1	400	14	6	2,56	270
3-%2	100	14	10	2,34	246
3-%2	200	16	8	2,36	248
3-%2	300	10	6	2,58	271
3-%2	400	12	4	2,55	270
4-%3	100	16	6	2,56	269
4-%3	200	14	4	2,71	285
4-%3	300	12	10	2,61	277
4-%3	400	10	8	2,78	292

6.3. İşleme Parametrelerinin Kerf Üzerindeki Etkisi

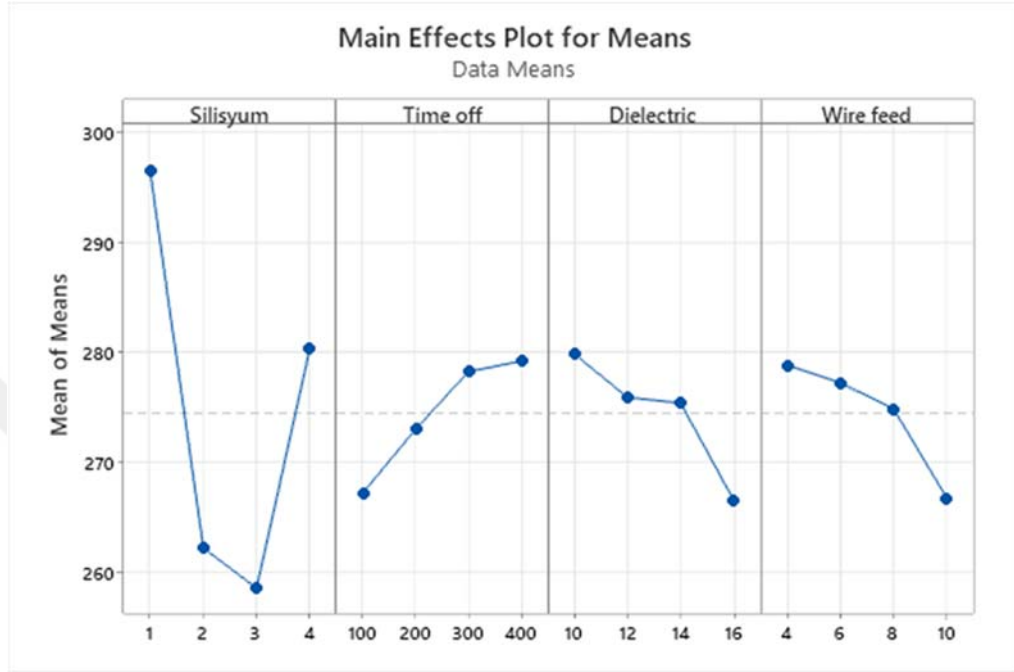
Bu çalışmada, silisyum miktarının ŞHA'nın tel erozyonla işleminin silisyum elementinin etkisi incelemiştir. Klasik ŞHA'nın tel erozyonla işlenmesindeki etkili parametrelerin yerini silisyum oranı almıştır. Kerf genişliği için yapılan Taguchi ve ANOVA analizleri, Ni-Ti ŞHA'nın WEDM ile işlenmesinde en etkili parametrenin silisyum oranı olduğunu göstermiştir.

Tel erozyon işlemlerinde kerf değeri, işleme hassasiyetini ve geometrik doğruluğu doğrudan etkileyen temel parametrelerden biridir. Ni-Ti ŞHA üzerinde gerçekleştirilen deneyler incelendiğinde, puls ara süresi, yalıtkan sıvı basıncı, tel ilerleme hızı ve tel gerginliği gibi parametrelerin kerf üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu görülmüştür.

Puls ara süresinin artırılmasıyla birlikte kesme genişliğinde genel olarak artış meydana gelmiştir. Bunun nedeni, uzun puls aralıklarında oluşan yüksek enerjili deşarjların, Ni-Ti alaşımının lokal erime ve buharlaşma davranışını artırmasıdır. Özellikle ŞHA'nın düşük ısı iletkenliği, ısının kesme bölgesinde yoğunlaşmasına ve kerf değerlerinin büyümesine neden olmuştur (Şekil 6.10).

Yalıtkan sıvı basıncının yükseltilmesi, erozyon bölgesinde oluşan erimiş ve yeniden katılaşmış partiküllerin ortamdan daha etkin biçimde uzaklaştırılmasını sağlamış ve bu

durum kerf değerlerinin azalmasına katkı sunmuştur. Tel ilerleme miktarının artması ile kerf değerlerinde de genel bir düşüş gözlenmiştir. Elde edilen bulgular, Ni-Ti ŞHA'nın tel erozyonla işlenmesinde tel erozyon parametrelerinin kerf üzerinde son derece etkili olduğunu ortaya konmuştur.



Şekil 6.10 : Parametrelerin Kerf üzerine etkisi

Kesme genişliği kerf açısından değerlendirildiğinde, Çizelge 6.4 de verilen ANOVA sonuçlarına göre silisyum oranı %73,30 ile en baskın parametre olarak belirlenmiştir. Bunu sırasıyla dielektrik (%10,21), tel ilerleme (%9,99) ve bekleme süresi (%5,90) takip etmektedir. Burada silisyum değeri %2'ye kadar kerf değerini düşürmüştü daha fazla oranda katıldığında tekrar artırmıştır. Bu bağlamda alaşıma %2'ye kadar silisyum katılması, kerf üzerinde etkili olmuştur.

Çizelge 6.4 : Kerf için varyans analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Silisyum	3	3897,61	79,18%	3897,61	1299,20	174,53	0,001
Time off	3	422,61	8,58%	422,61	140,87	18,92	0,019
Dielectric	3	311,91	6,34%	311,91	103,97	13,97	0,029
Wire feed	3	268,29	5,45%	268,29	89,43	12,01	0,035
Error	3	22,33	0,45%	22,33	7,44		
Total	15	4922,75	100,00%				

Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen regresyon denklemi aşağıda Çizelge 6.5’ de verilmiştir.

Çizelge 6.5 : Kerf için regresyon deklemi

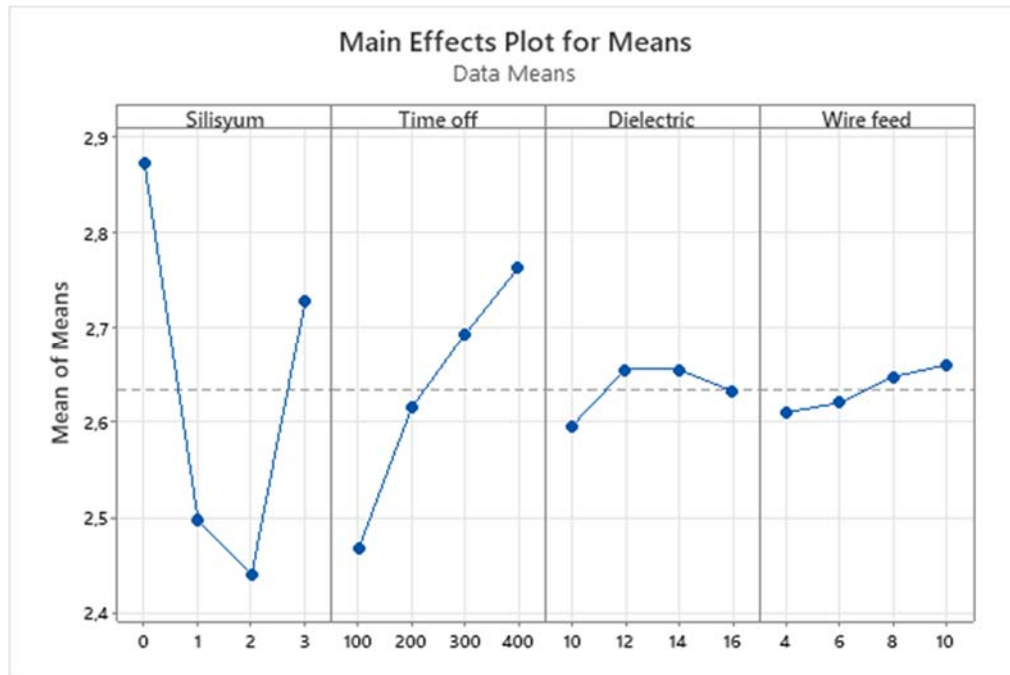
Kerf	$274,403 + 22,06 \text{ Silisyum}_1 - 12,17 \text{ Silisyum}_2 - 15,80 \text{ Silisyum}_3 + 5,91 \text{ Silisyum}_4$ $- 7,18 \text{ Time off}_{100} - 1,40 \text{ Time off}_{200} + 3,81 \text{ Time off}_{300} + 4,77 \text{ Time off}_{400}$ $+ 5,42 \text{ Dielectric}_{10} + 1,48 \text{ Dielectric}_{12} + 0,96 \text{ Dielectric}_{14} - 7,87 \text{ Dielectric}_{16}$ $+ 4,41 \text{ Wire feed}_4 + 2,80 \text{ Wire feed}_6 + 0,43 \text{ Wire feed}_8 - 7,64 \text{ Wire feed}_{10}$
------	--

6.4. İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisi

Yüzey pürüzlülüğü, Ni-Ti ŞHA’nın özellikle biyomedikal ve hassas mühendislik uygulamalarındaki performansı açısından kritik bir kalite göstergesidir. Deneysel sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün işleme parametrelerine duyarlı olduğunu göstermiştir.

Düşük puls ara süresi değerlerinde daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Kısa puls aralıklarında gerçekleşen kontrollü deşarjlar, Ni-Ti alaşım yüzeyinde daha küçük kraterlerin oluşmasına neden olmuş ve böylece daha düzgün bir yüzey morfolojisi ortaya çıkmıştır. Puls ara süresinin artmasıyla birlikte krater boyutlarının büyüdüğü ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.11).

Tel ilerleme hızının artırılması, belirli bir sınır dahilinde yüzey kalitesini iyileştirici etki göstermiştir. Bununla birlikte, aşırı tel ilerleme hızlarında kesme stabilitesinin bozulduğu ve yüzey üzerinde düzensiz erozyon izlerinin oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.11 : Parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Yüzey pürüzlülüğü (Ra) açısından değerlendirildiğinde, ANOVA sonuçlarına göre (Çizelge 6.6) silisyum oranı %73,30 ile en baskın parametre olarak belirlenmiştir. Bunu sırasıyla dielektrik (%10,21), tel ilerleme (%9,99) ve bekleme süresi (%5,90) takip etmektedir. Ni-Ti alaşımlarında artan enerji yoğunluğu yüzeyde yeniden ergime ve mikro çatlak oluşumuna neden olarak Ra değerlerini artırmaktadır.

Çizelge 6.6 : Yüzel pürüzsüzlüğü için varyans analizi

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Silisyum	3	0,311619	73,30%	0,311619	0,103873	121,31	0,001
Time off	3	0,025069	5,90%	0,025069	0,008356	9,76	0,047
Dielectric	3	0,043419	10,21%	0,043419	0,014473	16,90	0,022
Wire feed	3	0,042469	9,99%	0,042469	0,014156	16,53	0,023
Error	3	0,002569	0,60%	0,002569	0,000856		
Total	15	0,425144	100,00%				

Yüzey pürüzlülüğü için elde edilen regresyon denklemi aşağıda Çizelge 6.7’de verilmiştir

Çizelge 6.7 : Yüzey pürüzlülüğü için regresyon deklemini

Kerf	274,403 + 22,06 Silisyum_1 - 12,17 Silisyum_2 - 15,80 Silisyum_3 + 5,91 Silisyum_4 - 7,18 Time off_100 - 1,40 Time off_200 + 3,81 Time off_300 + 4,77 Time off_400 + 5,42 Dielectric_10 + 1,48 Dielectric_12 + 0,96 Dielectric_14 - 7,87 Dielectric_16 + 4,41 Wire feed_4 + 2,80 Wire feed_6 + 0,43 Wire feed_8 - 7,64 Wire feed_10
------	---

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ni-Ti ŞHA'a silisyum elementi eklenerek tel erozyon (WEDM) yöntemi ile işlenebilirliği deneysel olarak incelenmiş ve işleme parametrelerinin kesme genişliği (kerf), yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Isıl işlem sonrası Taguchi L₁₆ deney tasarımı kullanılarak yapılan deneysel çalışma ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. XRD analizlerinde tüm numunelerin oda sıcaklığında östenit faza karşılık gelen kübik kristal yapıyı koruduğu ve herhangi bir ikincil faza ait ek kırınım pikinin oluşmadığı belirlenmiştir
2. Özellikle Si katkı oranı arttıkça, Si sinyal yoğunluğunun tüm analiz alanı boyunca düzenli biçimde arttığı; ancak belirli bölgelerde yığılma, ada oluşumu ya da Si zengin ikincil fazlara işaret eden lokal yoğunluk artışlarının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Si atomlarının Ni-Ti matrisinde çözündüğünü ve alaşımın kimyasal olarak tekdüze bir yapı sergilediğini göstermektedir
3. Bragg yasası çerçevesinde değerlendirildiğinde, (011) pikinin daha yüksek 2 θ açılara kayması, düzlemler arası mesafenin ve dolayısıyla birim hücre boyutunun küçüldüğünü göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, Si atomlarının Ni-Ti matrisi içerisinde katı çözelti şeklinde çözündüğünü ve B2 düzenli östenit fazının yapısal kararlılığını koruduğunu ortaya koymaktadır
4. Si atomunun atomik yarıçapı (~1.11 Å), Ni (~1.24 Å) ve Ti (~1.47 Å) atomlarına kıyasla daha küçüktür. Ni ve Ti oranı sabit tutularak sisteme Si eklenmesi, kristal örgü içerisinde lokal büzülmelere neden olmakta ve bu etki makroskopik ölçekte örgü parametresinde azalma olarak kendini göstermiştir
5. EDX analizleri, farklı bölgelerden alınan noktasal ölçümler üzerinden gerçekleştirilmiş olup, alaşımın ana bileşenleri olan Ni ve Ti elementlerinin atomik oranlarının nominal bileşimle uyumlu olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, Si ilavesi yapılan numunelerde Si elementine ait karakteristik piklerin belirgin şekilde ortaya çıktığı ve Si içeriğinin katkı oranı arttıkça düzenli bir artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir
6. Numunelerin mikro yapısal ölçekteki elementel dağılımını incelemek amacıyla gerçekleştirilen elementel mapping analizleri, Ni, Ti ve Si elementlerinin tüm numune yüzeyi boyunca homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir

7. Tel erozyon işlemi, Ni-Ti ŞHA'nın geleneksel yöntemlerle işlenmesinde karşılaşılan zorlukları ortadan kaldıran, hassas ve temassız bir işleme yöntemi olarak etkinlik göstermiştir. Özellikle alaşımın faz dönüşümüne duyarlı yapısı göz önüne alındığında, tel erozyonun kontrollü enerji aktarımı önemli bir avantaj sağlamıştır
8. Puls ara süresi, işleme çıktıları üzerinde belirleyici bir parametre olarak öne çıkmıştır. Puls ara süresinin artması kesme genişliği ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinde artışa neden olmuştur. Bu durum, Ni-Ti alaşımların düşük ısı iletkenliği nedeniyle oluşan lokal ısı birikimiyle ilişkilendirilmektedir.
9. Yalıtkan sıvı basıncının artırılması, işleme bölgesinde oluşan erozyon artıklarının daha etkin biçimde uzaklaştırılmasını sağlamış ve bu sayede hem yüzey kalitesi hem de kesme stabilitesi olumlu yönde etkilenmiştir. Yüksek basınç değerlerinde daha dar kerf ve daha düzgün yüzeyler elde edilmiştir.
10. Tel ilerleme hızı, işleme verimliliği ile yüzey kalitesi arasında dengeleyici bir rol üstlenmiştir. Yüksek tel ilerleme hızlarında yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir.
11. Ni-Ti ŞHA da, hem kerf genişliği hem de yüzey pürüzlülüğü açısından en baskın parametrenin silisyum oranı olduğunu ortaya koymuştur. Uygun parametre kombinasyonları ile Ni-Ti alaşımlarında düşük Ra ve kontrollü kerf değerleri elde edilebileceği belirlenmiştir.
12. Kesme genişliği kerf açısından değerlendirildiğinde, ANOVA sonuçlarına göre silisyum oranı %79,18 ile en baskın parametre olarak belirlenmiştir. Bunu sırasıyla dielektrik (%6,34), tel ilerleme (%5,45) ve bekleme süresi (%8,58) takip etmektedir. Burada silisyum değeri %2'ye kadar kerf değerini düşürmüş daha fazla oranda katıldığında tekrar artırmıştır. Bu bağlamda alaşıma %2'ye kadar silisyum katılması, kerf üzerinde etkili olacaktır.
13. En uygun kerf değerinin %2 silisyum içeren numunenin time off 200 μ s' de dielektrik bar basıncı 14 barda Wire feed 10 m/min'de 246 μ olarak tespit edilmiştir.
14. Yüzey pürüzlülüğü için yapılan istatistiksel analizlerde silisyum oranı %73,30 katkı oranı ile en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Ni-Ti alaşımlarında artan enerji yoğunluğu yüzeyde yeniden ergime ve mikro çatlak oluşumuna neden olarak Ra değerlerini artırmaktadır. Burada silisyum değeri %2'ye kadar Ra değerini düşürmüş daha fazla oranda katıldığında tekrar artırmıştır. Bu bağlamda alaşıma %2'ye kadar silisyum katılması, Ra üzerinde etkili olacaktır.

15. En uygun Ra değerleri yine %2 silisyum içeren numunenin Time off 200 μ s' de dielektrik bar basıncı 14 barda Wire feed 10 m/min'de 2,34 μ m olarak tespit edilmiştir

Genel olarak elde edilen bulgular, ısııl işlem görmüş silisyum katkılı Ni-Ti şHA'ın tel erozyon yönteminin işlenmesinde hem kesme genişliği hem de yüzey pürüzsüzlüğü açısından, saf Ni-Ti şHA da oranla daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] **Kaya, E., & Kaya, İ.** (2025). Eş atomlu NiTi şekil hafızalı alaşımların geleneksel hızlarda frezelenmesinde işlenebilirlik performansı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(3), 932–936.
- [2] **Çakmak, Ö., & Kaya, M.** (2017). Akıllı malzeme şekil hafızalı alaşımların termodinamiği. Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(2), 541–555.
- [3] **Karabudak, C.** (2023). NiTi+Nd ve NiTi+La tozlarının mekanik öğütme sonrası boro-sinterleme yöntemi ile numune üretimi ve karakterizasyonu (Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [4] **Güven, S., Gökkaya, H., Motorcu, A. R., & Sur, G.** (2022). Şekil hafızalı alaşımların fonksiyonel özellikleri ve şekil hafıza eğitim süreçleri.
- [5] **Losertová, M., Štencek, M., Matýsek, D., Štefek, O., & Drápala, J.** (2017). Microstructure evolution of heat treated NiTi alloys. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 266(1), 012008.
- [6] **Toptaş, E., & Akkuş, N.** (2013). Şekil hafızalı metallerin mekanik yapısındaki faz değişimlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 10(1), 25–33.
- [7] **Kaya, M., & Atlı, K. C.** (2016). Şekil hafızalı alaşımlarda martensitik faz dönüşümü ve şekil hafıza mekanizması. Journal of Selcuk-Technic, 15, 1–10.
- [8] **Canbay, C. A., & Özkul, İ.** (2018). Yaşlandırma süresinin TiNi şekil hafızalı alaşımında termodinamik parametreler ve yapısal özellikler üzerine etkisinin incelenmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 30(2), 313–318.
- [9] **Altaş, S., & Yılmaz, E.** (2019). İtfaiyeci giysilerinin koruma performansının şekil hafızalı yay kullanılarak geliştirilmesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(2), 313–320.
- [10] **Şaşmaz, M.** (2019). Mn içeriğinin $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ manyetik şekil hafızalı alaşımlarının termal ve manyetik özelliklerine etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23(1), 15–19.
- [11] **Dağdelen, F., Buytoz, S., & Akbaş, İ.** (2017). NiTi şekil hafızalı alaşımlarda Cu ilavesinin termal ve mikroyapı özelliklerine etkileri. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(1), 269–275.
- [12] **Dilibal, S.** (2003). Nikel-titanyum şekil bellekli alaşımlar kullanılarak geliştirilen İTÜ robot el ve performans analizleri.

- [13] **Akdoğan Eker, A. & Nurveren, K.** (2003). Şekil hafızalı alaşımlar. Mühendis ve Makina, 44(521), 35–44.
- [14] **Yavuz, H. İ., & Ymanoğlu, R.** (2023). β tipi Ti alaşımlarının özellikleri üzerine bir derleme. Politeknik Dergisi, 26(4), 1601–1620.
- [15] **Orhan, E. O.** (2021). Endodontik şekillendirmede kullanılan güncel nikel-titanyum enstrümanların metalürjik ve tasarımsal özellikleri. İzmir Dişhekimleri Odası Bilimsel Dergisi, 41.
- [16] **Yılmaz, M., Güven, S., Motorcu, A. R., & Gökkaya, H.** (2021). Nikel-titanyum şekil hafızalı alaşımların elektro erozyon ile işlenebilirliği üzerine bir derleme çalışması.
- [17] **Güven, S.** (2024). Yüksek Sıcaklık, Yaşlandırma ve Kriyojenik Koşulların Niti Şekil Hafızalı Alaşımların Mekanik Özelliklerine ve Faz Dönüşüm Sıcaklıklarına Etkisi.
- [18] **Güven, S., Karataş, M. A., Gökkaya, H., & Akınay, Y.** (2022). The Effect Of High Temperature And Aging Heat Treatment On Superelastic Niti Shape Memory Alloys. Dicle University Journal of Engineering, 13(1), 1–10.
- [19] **Güven, S.** (2024). Niti Şekil Hafızalı Alaşımlara Uygulanan Elektro Parlatma İşleminin Yorulma Ömrü ve Korozyon Direnci Üzerine Etkileri.
- [20] **Güven, S., & Motorcu, A. R.** (2022). Nikel-Titanyum Şekil Hafızalı Alaşımların İşlenmesinde Kullanılan Proseslerin Kerf Açısı Bakımından Değerlendirilmesi. 9th International Congress on Engineering, Architecture and Design, 72–80.
- [21] **Özkul, İ., Canbay, C. A., & Kalay, E.** (2020). Farklı Yaşlandırma Parametreleri ile Niti Alaşımda Meydana Gelen Yapısal ve Kinetik Parametrelerin Analizi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 32(2), 7–19.
- [22] **Gökmeşe, H., Karadağ, H., & Tanış, N.** (2020). Nb İlavesinin Niti Alaşımlarında Mikroyapı ve Sertlik Üzerine Etkisi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(4), 1816–1824.
- [23] **Düzgören, N., Onar, V., & Özen, F.** (2024). Şekil Hafızalı ve Süperelastik Niti Esaslı Alaşım Nitinol’ün Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması. İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 5(2), 104–117.
- [24] **Akdoğan, G., & İstanbullu, Ö. B.** (2020). Damar İçi Stentlerde Malzeme Seçimi ve Tasarımın Restenoz Üzerine Etkileri. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 204–215.
- [25] **Önay, G.** (2024). Şekil Hafızalı Nitinol Malzemelerin Biyomedikal Uygulamalarda Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi (Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [26] **Tüylek, Z.** (n.d.). Bölüm 13.

- [27] **Ercan, E., & Dağdelen, F.** (2020). Tinb Esaslı B-Ti Alaşımlarında Tantal Katkısının Etkileri. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(4), 1545–1553.
- [28] **Bülbül, S.** (2023). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Biyomalzemeler Timoni Alaşımlarının Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin Araştırılması (Yüksek lisans tezi, Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [29] **Aksöz, S., Bostan, B., & Kaplan, Y.** (2021). Borlama İşleminin T/M Yöntemiyle Üretilmiş Niti Alaşımının Mikroyapı ve Mikrosertliğine Etkileri. Politeknik Dergisi, 24(2), 539–544.
- [30] **Aydoğmuş, T., & Bor, Ş.** (2011). Geleneksel Toz Metalurjisi Yöntemiyle Gözenekli Tini Alaşımların Üretimi ve Karakterizasyonu. 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Kongresi, Ankara, Türkiye, 817–824.
- [31] **Aydoğmuş, T., & Bor, Ş.** (2011). Tini Köpüklerde Şekil Bellek Davranışı ve Faz Dönüşüm Sıcaklıklarının İncelenmesi. 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Kongresi, Ankara, Türkiye, 487–494.
- [32] **Kanca, M. S.** (2022). Niti Şekil Hatırlamalı Alaşımların Termal Buharlaştırma Yöntemi ile Kaplanabilirliği, Karakterizasyonu ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi (Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [33] **Ayyıldız, M., Kırat, G., & Aksan, M. A.** (2022). Mo Eklenmiş Nimnsb Alaşımlarında Manyetik Alan Kaynaklı Martensitik Dönüşüm Özellikleri. Journal of Investigations on Engineering and Technology, 5(2), 142–149.
- [34] **Qader, I. N., Kök, M., Dağdelen, F., & Aydoğdu, Y.** (2019). A Review Of Smart Materials: Researches And Applications. El-Cezeri, 6(3), 755–788.
- [35] **Dilibal, S.** (2005). Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşım Üretimi ve Şekil Bellek Eğitimi (Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [36] **Mandegarian, S., & Hojjati, M.** (2025). Shape Memory Alloy Assisted Healing Of Thermoplastic Composite Laminates Under Repeated İmpact Loading. Composite Structures, 358, 118977.
- [37] **Wen, S., Gan, J., Li, F., Zhou, Y., Yan, C., & Shi, Y.** (2021). Research Status And Prospect Of Additive Manufactured Nickel-Titanium Shape Memory Alloys. Materials, 14(16), 4496.
- [38] **Cascadan, D., & Grandini, C. R.** (2019). Structure, Microstructure, And Selected Mechanical Properties Of Ti–Ni Alloys. In Recent Advancements İn Metallurgical Engineering. IntechOpen.

- [39] **Kök, M., & Ateş, G.** (2017). The Effect Of Addition Of Various Elements On Properties Of Niti-Based Shape Memory Alloys For Biomedical Applications. *European Physical Journal Plus*, 132(4), 185.
- [40] **Meshri, H. A. M.** (2019). An Investigations Into The Micro Wire Electrical Discharge Machining Of Shape Memory Alloy (Yüksek lisans tezi, Atılım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [41] **Rogers, C. A.** (1988). Intelligent materials. *Scientific American*, 259(6), 84–90.
- [42] **Culshaw, B.** (1996). *Smart structures and materials*. Artech House
- [43] **Gandhi, M. V., & Thompson, B. S.** (1992). *Smart materials and structures*. Chapman & Hall.
- [44] **Otsuka, K., & Wayman, C. M.** (1998). *Shape memory materials*. Cambridge University Press.
- [45] **Liu, Y., et al.** (2006). Shape memory polymers. *Journal of Applied Polymer Science*.
- [46] **Dutta, A. K., & Ghosh, P.** (2019). *Smart materials: Concepts and applications*. CRC Press.
- [47] **Duerig, T., Pelton, A., & Stöckel, D.** (1999). An overview of shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*, 273–275, 149–160.
- [48] **Babalık, F. C., ve Çavdar, K.** (2018). *Makine Bilgisi Makine Mühendisliğine Giriş*. Dora Yayınları.
- [49] **Kul, Y.** (2012). Alışılmamış İmalat Yöntemlerinin Seçiminde Çok Kriterli Karar Verme Metotlarının Kullanılması. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [50] **Altuğ, M., Erdem, M., ve Ozay, C.** (2015). Experimental Investigation of Kerf of Ti6Al4V Exposed to Different Heat Treatment Processes in WEDM and Optimization of Parameters Using Genetic Algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9), 1573-1583.
- [51] **Çakır, M. V.** (2014). *Evaluation of Multi-Stage Electro Discharge Machining (EDM) Parameters*. (Doktora Tezi), Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [52] **Manoj, I. V., Soni, H., Narendranath, S., Mashinini, P. M., ve Kara, F.** (2022). Examination of Machining Parameters and Prediction of Cutting Velocity and Surface Roughness Using RSM and ANN Using WEDM of Altemp HX. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-9.

- [53] **Altuğ, M.** (2019). Investigation of machinability of welded jointed Hardox steel in WEDM. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 20(1), 92-103.
- [54] **Kura, F.** (2018). Optimization of cutting parameters in finishing milling of Hardox 400 steel. *Int J Anal Exp Finite Elem Anal*, 5(3), 44-49.
- [55] **Shah, A., Mufti, N., Rakwal, D., ve Bamberg, E.** (2011). Material Removal Rate, Kerf and Surface Roughness of Tungsten Carbide Machined with Wire Electrical Discharge Machining. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(1), 71-76.
- [56] **Singh, H., ve Khanna, R.** (2011). Parametric Optimization of Cryogenic-Treated D-3 for Cutting Rate in Wire Electrical Discharge Machining. *Journal of Engineering & Technology*, 1(2), 59.
- [57] **El-Hofy, H.** (2005). *Advanced machining processes*. New York: McGraw-Hill Companies.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Fikri Baturalp BABANİKOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme

