

Ömer UĞURLU



**ISKENDERUN TEKNİK**  
ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**Co BAZLI ŞEKİL HAFIZALI  
MALZEMELERİN TEL EREZYON  
İŞLEM PARAMETRELERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Ömer UĞURLU**

OCAK 2019

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

OCAK 2019



**Co BAZLI ŞEKİL HAFIZALI MALZEMELERİN TEL EROZYON İŞLEM  
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**Ömer UĞURLU**

**YÜKSEK LİSANS  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2019**

Ömer UĞURLU tarafından hazırlanan "Co BAZLI ŞEKİL HAFIZALI MALZEMELERİN TEL EROZYON İŞLEM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Erdoğan KANCA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

**Başkan:** Prof. Dr. Metin KÖK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

**Üye:** Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 22/01/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



**ETİK BEYAN**

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılmayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



İmza

Ömer UĞURLU

22/01/2019

Co BAZLI ŞEKİL HAFIZALI MALZEMELERİN TEL EROZYON İŞLEM  
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ömer UĞURLU

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2019

ÖZET

Günümüzde gelişen teknolojiye paralel olarak endüstride kullanılan geleneksel malzemeler her geçen gün yerini yeni geliştirilen fonksiyonel malzemelere bırakmaktadır. Fonksiyonel malzemelerin başında akıllı malzemeler gelmekte olup, uygulanan harici bir kuvvet etkisinde şekil değiştirip bu etki kalktığında tekrar eski hallerine dönebilen malzemelerdir. Son zamanlarda geliştirilen Co-Ni-Al alaşımları, diğer şekil hafızalı alaşımlara göre; termal uygulamalar boyunca şekillendirilmek için yeterli sünekliğe, alaşımı meydana getiren bileşenlerin dönüşüm sıcaklığı ve Curie sıcaklığının düzenlenebilmesi ve ucuz olmalarından ötürü uzay ve havacılık endüstrisi, otomotiv endüstrisi ve tıp sektöründe kullanım alanı bulmaktadırlar. Üretilen şekil hafızalı alaşımların, şekillendirilme aşamasında, özelliklerinin kaybolmaması için ısı etkisi sınırlı olan, tel erozyonla kesme yöntemi, oldukça fazla kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında son yılların popüler şekil hafızalı alaşımlarından olan CoNiAl alaşımının vakumlu döküm yoluyla üretimi yapılmıştır. Üretilen numunelerin optik, XRD, DSC analizleri yapıldıktan sonra farklı parametreler ile tel erozyon tezgâhında kesme işlemine tabi tutulmuştur. Tel erozyon kesme parametrelerinin (puls süresi, voltaj ve akım) yüzey pürüzlülüğüne, aşınma direncine ve yüzeyde kesme sonucu oluşan yeniden kristalleşen tabakanın mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Ayrıca, tel erozyonla kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin matematiksel modellenmesi genetik algoritma esaslı yöntemlerden birisi olan genetik programlama kullanılarak yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, tel erozyonla kesme parametrelerinin, yüzey pürüzlülük değerlerinden Ra'yı 2,06-3,18 µm ve yeniden kristalleşen tabaka kalınlığını 2,96-9,13 µm aralığında değiştirmeleri etkilediği gösterilmiştir. GEP sonucu eğitim ve test verilerine ait korelasyon katsayıları 0,764 ve 0,689 olarak tespit edilmiş ve model değerlerin çoğunlukla hedef değerler etrafında kümelendiği tespit edildiği gözlenmiştir.

AnahtarKelimeler : Co Bazlı Sekil Hafızalı Alaşımlar, Tel Erozyon, İşlenebilirlik, Genetik Programlama.

SayfaAdedi : 77

Danışman : Doç. Dr. Erdoğan KANCA.

# INVESTIGATION OF WIRE EROSION OPERATION PARAMETERS OF Co BASED SHAPE MEMORY ALLOYS

(M. Sc. Thesis)

Ömer UĞURLU

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

JANUARY 2019

## ABSTRACT

Nowadays, in parallel with the developing technology, the traditional materials used in the industry are being replaced by the newly developed functional materials. Among the functional materials, smart materials are regarded as the foremost; they can change their shape during presence of an external force and change back to their original shape when the external force is removed. The recently developed Co-Ni-Al alloys, when compared to other shape-remembered alloys have advantages such as having the high ductility for shaping along the thermal applications, making it possible to regulate the conversion temperature of the alloy-forming components as well as the Curie temperature and being inexpensive, thus the alloys are started to be used in the aerospace industry, the automotive industry and the medical sectors. When shape-remembered alloys are shaped, in order to avoid loss of properties the heat effect should be limited, thus the method of wire erosion cutting is extensively used.

In this thesis, the production of CoNiAl alloy, which is one of the popular shape remembered alloys of recent years, was made by vacuum casting. After the optical, XRD and DSC analyzes of the produced samples were done, they were subjected to the wire erosion cutting machine with different parameters. The effects of wire erosion cutting parameters (pulse duration, voltage and current) on surface roughness, abrasion resistance and the recrystallization layer formed as a result of surface cutting are investigated. In addition, mathematical modeling of the effects of wire erosion cutting parameters on surface roughness was done by using genetic programming which is one of the genetic algorithm based methods.

As a result of the studies, it was shown that the cutting parameters of wire erosion affected the Ra value of surface roughness in the range of 2.06-3.18  $\mu\text{m}$  and the re-crystallizing layer thickness in the range of 2.96-9.13  $\mu\text{m}$ . Furthermore, as the result of the GEP the correlation coefficients for the training and test data were determined as 0.764 and 0.689, and it was observed found that the model values were mostly clustered around the target values.

KeyWords : Co based shape memory alloy, Wire EDM, Machinability, GEP

PageNumber : 77

Supervisor : Assoc. Prof. Erdoğan KANCA

## TEŞEKKÜR

Beni yüksek lisans öğrencisi olarak kabul eden, bu çalışmanın planlanması ve yürütülmesinde bana destek olan, bilgi ve tavsiyelerini benimle paylaşan danışmanım Sayın Doç. Dr. Erdoğan KANCA'ya teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca gerekli kolaylığı gösteren, değerli görüş ve katkılarıyla hiçbir desteği esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜNEN'e ve Arş Gör. Mehmet DEMİR'e ve isimlerini burada zikredemediğim ama yardımlarını esirgememiş herkese içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, bugünlere gelmemde üzerimde büyük emeği olan annem, babam ve kardeşlerime, bu süreçte desteğini ve her zaman yanımda olan kıymetli eşim Dilek UĞURLU'ya, oğlum Mustafa Raif UĞURLU'ya ve kızım Hatice Şeyma UĞURLU'ya içten sevgi ve şükran duygularıyla teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Şekil Hafızalı Alaşımlar.....	2
1.1.1. Şekil Hafızalı Alaşımlarda FazDönüşümleri.....	5
1.1.2. Şekil Hafızalı Mekanizmasının Oluşumu.....	7
1.1.3. Kobalt Esaslı Şekil Hafızalı Alaşımlar.....	9
1.2. Tel Erozyon Yöntemi.....	11
1.2.1. Tel Erozyon Çalışma Prensipleri.....	12
1.2.2. Tel Erozyon İle Kesme İşleminde İşlem Parametreleri.....	14
1.2.3. Elektro erozyon ile işleminin avantajları ve dezavantajları.....	17
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	18
2.1. Şekil Hafızalı Malzemeler.....	18
2.2. Tel Erozyon Yöntemindeki Çalışmalar.....	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
3.1. Materyal.....	27
3.1.1. Co-Ni-Al Şekil Hafızalı Alaşımın Üretimi.....	27
3.1.2. Faz Analizleri.....	27
3.1.3. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümleri.....	27
3.2. Yöntem.....	28
3.2.1. Tel Erozyon Yöntemi.....	28
3.2.2. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri.....	31
3.2.3. Genetik programlama (GEP).....	31
3.2.4. Metalografik incelemeler.....	32
3.2.5. Mikro sertlik incelemeleri.....	32
3.2.6. Nano İndentasyon İncelemeleri.....	32
3.2.7. Aşınma Testleri.....	35



4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	37
4.1. CoNiAl Alaşımının Spektral Analiz Sonuçları.....	37
4.2. XRD analizleri.....	37
4.3. CoNiAl Alaşımının DSC Analizleri.....	38
4.4. Yüzey Pürüzlülüğü.....	39
4.5. Genetik programlama (GEP).....	40
4.6. Optik Mikro Yapı Analizi.....	44
4.7. Sertlik Ölçme Deneyi.....	49
4.7.1. Mikro Sertlik Ölçümü.....	49
4.7.2. Nano İndentasyon.....	50
4.8. Aşınma Deneyleri.....	58
4.8.1. Sürtünme katsayısı ve Aşınma İzlerinin Karakterizasyonu.....	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	37
KAYNAKAR.....	37
ÖZGEÇMİŞ.....	37
DİZİN.....	77

## ÇİZELGELER LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. SPM EZ20S Tezgâhın Özellikleri (Kullanım kılavuzundan alıntıdır.....	28
Çizelge 3.2. Pirinç Tel Kimyasal Kompozisyonu.....	29
Çizelge 3.3. Tel Erozyon Kesme Parametreleri.....	30
Çizelge 4.1. CoNiAlCu süper alaşımının kimyasal kompozisyonu.....	37
Çizelge 4.2. Kesme parametrelerine göre ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri.....	39
Çizelge 4.3. Modelde Kullanılan Değişkenler.....	40
Çizelge 4.4. GEP model değişkenleri.....	41
Çizelge 4.5. Fonksiyon Set Listesi.....	41
Çizelge 4.6. Denenen GEP Modellerinin İstatistiksel Sonuçları.....	42
Çizelge 4.7. En iyi GEP Modelinin İstatistiksel Sonuçları.....	43
Çizelge 4.8. Tel Erozyon Kesme Parametrelerinde elde edilen Ortalama Beyaz.. Tabaka Kalınlıkları.	47
Çizelge 4.9. 4 numaralı numunenin beyaz tabakasının mekanik değerleri.....	53
Çizelge 4.10. 4 numaralı numunenin ana malzemenin mekanik değerleri.....	54
Çizelge 4.11. 4 numaralı numunenin beyaz tabakasının mekanik değerleri.....	55
Çizelge 4.12. 4 numaralı numunenin ana malzemenin mekanik değerleri.....	56

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1 Şekil 1.1 Martenzitik dönüşüm. a) Östenit fazda $\beta$ fazlı kristal,.....	6
b) Martenzitik dönüşüm sonrasında oluşan ikizlenme A, B, C ve D varyantları, c) Baskın A varyantı	
Şekil 1.2. Sıcaklık değişim ve martenzitik dönüşüme bağlı histerisiz (H) değişim grafiği.	6
Şekil 1.3. Şekil hafıza olayının mekanizması.....	8
Şekil 1.4. CoNiAl alaşımlarının faz diyagramları.....	9
Şekil 1.5. Tel erozyon ile işleme, (a) işlemin şematik olarak gösterilmesi.....	13
işlemin elektrik devres	
Şekil 1.6. Tel erozyonla işlenmiş parçalar.....	14
Şekil 3.1. Tel erozyon yöntemi ile kesilen numunelerin teknik resmi.....	30
Şekil 3.2. Yük batma derinliği eğrisi.....	33
Şekil 3.3. Nanosertlik ölçümlerinde kullanılan yük fonksiyonu.....	35
Şekil 3.4. Aşınma izin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi.....	36
Şekil 4.1. CoNiAl alaşımının XRD analizi.....	37
Şekil 4.2. 1100°C de homojenize edilen numunesinin 5°C/dakika ısıtma ve soğutma. sonucu elde edilen DSC eğrileri.	38
Şekil 4.3. Eğitim Verileri için GEP Modeli Sonuçlarının Deneysel Verilerle.....	43
Karşılaştırılması.	
Şekil 4.4. Test Verileri için GEP Modeli Sonuçlarının Deneysel Verilerle.....	43
Karşılaştırılması.	
Şekil 4.5. 4 numaralı numunenin yük-yer değiştirme eğrisi.....	51

Şekil 4.6. 5 N yük altında 125 m boyunca lineer aşınma testine tabi tutulan ..... 58  
numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.



## RESİMLER LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. SPM EZ20S Tel erozyon tezgâhı.....	28
Resim 3.2. Çalışmada kullanılan pirinç tel elektrotlar.....	29
Resim 3.3. Tel erozyon yöntemi ile kesilen numune görünümleri.....	31
Resim 4.1. CoNiAl alaşımının mikro yapı resmi a) 200X b) 500X c)1000X.....	44
Resim 4.2. CoNiAl alaşımının kesme yüzeyinde oluşan yeniden katılaştıran tabakanın..	46
Resim 4.3. Tel Erozyon ile işleme sonucu oluşan beyaz tabaka görünümleri.....	48
Resim 4.4. Tel erozyon yöntemi ile kesilen numunelerden alınan sertlik..... izlerinin Gösterimi.	49
Resim 4.5. 4 numaralı numune görünümü.....	51
Resim 4.6. 4 numaralı numunenin beyaz tabakasında oluşturulan çentiğin SPM.....	52
Resim 4.7. 4 numaralı numunenin ana malzemede oluşturulan çentiğin SPM.....	53
Resim 4.8. 21 numaralı numune görünümü.....	54
Resim 4.9. 21 numaralı numunenin yük-yer değiştirme eğrisi.....	55
Resim 4.10. 21 numaralı numunenin beyaz tabakada oluşturulan çentiğin SPM.....	56
Resim 4.11. 21 numaralı numunenin ana malzemede oluşturulan çentiğin SPM.....	57
Resim 4.12. N1 numunesinin yüzeyinden alınan 3D aşınma iz görünümü.....	60
Resim 4.13. N4 numunesinin yüzeyinden alınan 3D aşınma iz görünümü.....	61
Resim 4.14. 5 N yük ve 125 m kayma mesafesi ile aşınma işlemine tabi tutulan N1 .....	63
Resim 4.15. 5N yük ve 125 m kayma mesafesi ile aşınma işlemine tabi tutulan N4.....	64

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$M_s$	Martenzit başlama
$A_f$	Östenit başlama
$M_f$	Martenzit Fazı
<b>A</b>	Austenit
<b>M</b>	Martenzit
<b>T</b>	Sıcaklık
<b>H</b>	Histerisi
<b>L</b>	Uzunluk
$\epsilon$	Elastiklik
<b>B</b>	Faz bölgesi
$\gamma$	Martenzit faz bölgesi
$\beta$	Östenit faz bölgesi
$L1_0$	(tetragonal) martensit faz bölgesi
$T_{on}$	Vurum Süresi Mikro saniye
$T_{off}$	Vurum Ara Süresi Mikro saniye
$^{\circ}C$	Derece
<b>K</b>	Kalori
$\alpha$	Açı
$T_c$	Curie sıcaklığı
<b>Ra</b>	Yüzeydeki Ortalama Pürüzlülük ölçüm Değeri
<b>Rz</b>	Yüzeydeki Pürüzlülük Farkı
<b>Am</b>	Östenit yaşlandırma
<b>Mm</b>	Martenzit Yaşlandırma
<b>Co</b>	Kobalt
<b>Ni</b>	Nikel
<b>Al</b>	Alüminyum
<b>Ti</b>	Titanyum

<b>Sn</b>	Kalay
<b>Ar</b>	Argon
<b>P</b>	Fosfor
<b>Arc</b>	Melter Yöntemi
<b>Fcc</b>	Ferromanyetik
<b>Si</b>	Silisyum
<b>Ga</b>	Galyum
<b>O</b>	Oksijen
<b>Cu</b>	Bakır
<b>Au</b>	Altın
<b>Mn</b>	Manganez
<b>Cd</b>	Kadmiyum
<b>Fe</b>	Demir
<b>HV</b>	Basınç Güç
<b>N</b>	Newton
<b><math>\mu N</math></b>	Mikro Newton
<b>Zn</b>	Çinko
<b>R</b>	Numune İsmi
<b>T</b>	Sıcaklık
<b>GPa</b>	Giga Pascal
<b>H</b>	Sertlik Değeri
<b><math>M_{max}</math></b>	Martenzit maksimum
<b><math>A_{max}</math></b>	Austenit maksimum
<b>T</b>	Sıcaklık
<b>°C</b>	Derece
<b><math>\mu m</math></b>	Mikrometre
<b>WC</b>	Tungsten Karbür
<b>Cc</b>	Kesici Takım ucu
<b><math>mm^3 - mm^3/Nm</math></b>	Milimetreküp-Milimetreküp/Newton metre
<b>mm</b>	Milimetre

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>SHA</b>	Şekil hafızalı alaşımlar
<b>EDM</b>	Elektro erozyonla işleme
<b>DSC</b>	Diferansiyel tarama kalorimetre ölçüm cihazı
<b>XRD</b>	X ışını kırınım yöntemi
<b>TGA</b>	Termogravimetrik Analiz
<b>HAD</b>	Hesaplama akışkanlar dinamiği
<b>GEP</b>	Genetik Programlama
<b>SEM</b>	Aşınma İzi Foto.
<b>SPM</b>	Taramalı Uç Mikroskobu
<b>NHT</b>	Nano İndetasyon Yöntemi ile Nanometre Mikron İz Açma Derinliği
<b>SiC</b>	Silisyum Karbür Zımpara Makinesi



## 1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiye paralel olarak endüstride kullanılan geleneksel malzemeler her geçen gün yerini yeni geliştirilen fonksiyonel malzemelere bırakmaktadır. Fonksiyonel malzemelerin başında da akıllı malzemeler gelmektedir. Akıllı malzemeler uygulanan harici "kuvvet" alanlarının etkisinde şekil değiştirip bu etki kalktığında tekrar eski hallerine dönebilen malzemeler olarak tanımlanabilir (Aydıncık, 2003). Akıllı malzemeler alanında net bir akademik veya bir ticari sınıflandırma sistemi bulunmamakla beraber en geniş ölçekte Piezoelektrik malzemeler, Magnetostriktif malzemeler ve Şekil Hafızalı malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Şekil hafızalı malzemeler bu malzemeler arasında en dikkat çeken malzeme gurubudur.

Şekil hafızalı malzemeler ısı değişimlere duyarlı fonksiyonel malzemeler olup uygun bir ısı işlem yoluyla esas şekil veya eski boyutuna geri dönebilme yetisine sahip malzemelerdir. Bu malzemeler kritik dönüşüm sıcaklığı üzerinde ve altında olmak üzere iki farklı şekil veya kristalografik yapıya sahip olmaları ile karakterize edilirler (Soğuksu, 2006). Oda sıcaklığı gibi düşük sıcaklıklarda deformasyona uğrayabilen bu malzemeler, sıcaklığın artırılması durumunda deformasyondan önceki şekillerine geri dönebilme yetilerine sahiptirler. Bu malzemeler sadece tek yönlü (ısıtma halinde) veya çift yönlü (ısıtma ve yeniden soğutma) şekil hafıza özelliklerine sahip olabilmektedirler (Hodgson, 2002).

Endüstriyel uygulamalarda en yaygın bilinen şekil hafızalı alaşımlar: Nikel-Titanyum ve Bakır esaslı alaşımlardır (Alkan ve Şehitoğlu 2019; Umale ve ark, 2014). Ancak, bu alaşımların muhteviyatındaki elementlerin pahalı olması bu alaşımlara alternatif alaşımların geliştirilmesi çalışmalarını tetiklemiştir. Bunun sonucunda da ferromanyetik CoNiAl, NiMnGa ve NiFeGa gibi yeni şekil hafızalı alaşımlar geliştirilmiştir (Chumlyakov, 2008; Nespoli, Biffi, Villa, Tuissi, 2017; Gerstein, 2018). CoNiAl alaşımları diğer şekil hafızalı alaşımlara göre; termal uygulamalar boyunca şekillendirilmek için yeterli sünekliliğe, alaşımı meydana getiren bileşenlerin dönüşüm sıcaklığı ve Curie sıcaklığının düzenlenebilmesi ve ucuz olmalarından ötürü uzay ve havacılık endüstrisi, otomotiv endüstrisi, elektronik endüstrisi ve tıp sektöründe kullanım alanı bulmaktadırlar (Chatterjee ve ark., 2008; Bu ve ark., 2018). Bu alaşımlar mekanik araçlarda yay

malzemesi, türbin motoru, robotik aletler gibi spesifik yerlerde kullanılmaktadır (Akis, 2012).

Spesifik yerlerde kullanımı söz konusu olduğundan şekil hafızalı bu alaşımların üretildikten sonra özelliklerini kaybetmeden şekillendirilerek nihai kullanım sahasına sunulmaları büyük önem arz etmektedir. Ancak bu malzemelerin kesme parametrelerinin malzemeye etkisi sadece NiTi alaşımları üzerinde yeni bir olgu olup sınırlı sayıdadır (Majumder ve Maity 2018; Divya, Hargovind, Narendranath S., 2018).

Öte yandan geleneksel üretim yöntemleriyle kesimi mümkün olmayan küçük veya dar parçaların tel erozyon yöntemi ile kesilebilmesi, üretilen parçaların yüzey pürüzlülüklerinin geleneksel yöntemlere göre düşük olması ve işlem sonrası herhangi bir taşlama gerektirmemesi tel erozyon yönteminin son 40 yıldır kullanımını en hızlı gelişen imalat yöntemlerinden birisi haline getirmiştir. Tel erozyon yöntemi ilk başlangıçta alüminyum, çelik ve titanyum gibi oldukça kullanım alanı bulunan demir esaslı malzeme gruplarına uygulanmış olsa da günümüzde kompozitlerden, WC-Co alaşımlarına, süper alaşımlara kadar birçok ileri mühendislik malzemesi gruplarına uygulanmaya başlamıştır (Nain, Garg, Kumar, 2018; Singh ve ark, 2018; Kumar, Sharma, Kumar, Khanna, 2018).

Bu çalışmada, şekil hafızalı CoNiAl alaşımının üretiminin yapılması, tel erozyon kesme parametreleri arasında en literatürde en etken parametreler olarak belirtilen puls süresi, voltaj ve akım değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğü, mikro yapı ve mekanik özelliklere (sertlik ve aşınma dirençleri) etkilerinin araştırılması yapılmıştır.

### **1.1.Şekil Hafızalı Alaşımlar**

Alaşım içerisinde fiziksel ve kimyasal özellikleri aynı olup homojen sınırlarla birbirinden ayrılmış özellikteki farklı bölgelere faz denir (Aksu, 2006). Fazların oluşum ve dönüşümlerindeki ana etken enerji içeriğidir. Malzemelerin enerji içeriği ise termodinamik denge olarak adlandırılan kimyasal bileşim, sıcaklık ve basıncın değişmesi ile değişir. Bu değişim faz dönüşümlerine neden olur (Gündüz, 2012). Yeni oluşan faz yapısına bağlı olarak malzemenin bazı özellikleri de değişecektir. Suyun buza veya buhara dönüşümü faz dönüşümlerine verilebilecek en iyi örnektir. Burada homojen olarak dizilmiş atomlar belirli bir fazı oluşturur. Ancak, termodinamik dengenin değişmesi durumunda denge bozulur.

Bozulan denge sonucunda atomlar değişik biçimde dizilerek başka bir denge konumuna geçer dolayısıyla yeni bir faz oluşturur.

Saf malzemeler tek bileşenli ve en basit yapıli sistemlerdir. Bunlar sıcaklık ve basınca bağlı olarak katı, sıvı ve gaz durumlarından biri şeklinde bulunurlar. Ancak, çok bileşenli sistemler olarak adlandırılan alaşımlar birden fazla atom içeren alaşımların dengesi oldukça karmaşıktır (Aksu, 2006; Gündüz, 2012).

Şekil hafızalı alaşımlar (SHA) şekil hafıza özellikleri ve süper plastisite özellikleri ile karakterize edilirler. Şekil hafıza özelliği uygun bir ısı işlem uygulaması sonucunda eski şekil veya boyutuna geri dönebilme yetisi olarak tanımlanabilir. Süper plastisite ise malzeme plastik deformasyona tabi tutulduğundan belli bir sıcaklık ve yük altında kopmadan önce malzemede boyun verme olmaksızın şekillendirilebilme yetisinin olmasıdır (Chang ve Araki, 2016). Dolayısıyla SMA'lar ısı değişimlere duyarlı malzeme grupları olduğundan kritik dönüşüm sıcaklıklarının altında ve üstünde farklı kristalografik yapı ve şekle sahip olurlar. Bu malzemeler sadece ısıtma halinde tek yönlü veya ısıtma ve yeniden soğutma halinde dönüşüm meydana gelmesi sebebiyle çift yönlü şekil hafıza özelliklerine sahip olabilmektedirler (Hodgson, 2002).

SMA'ların çoğu termoelastik martenzitik yapı sergiler. Martenzitik yapıya sahip SMA, dönüşüm sıcaklıklarının altında kayma ve ikizlenme deformasyon mekanizmaları ile şekillendirilebilirler. Isı uygulanması durumunda ikizlenmiş olan yapı ana faz yapısına döner ve böylece uygulanmış olan plastik deformasyon yok edilmiş olur (Liu ve ark.; Tanaka ve ark. 2006).

Şekil hafıza olayı sergileyen alaşımlarda östenit fazdan martensit faza geçiş, sıcaklık veya zor etkisi veya her ikisinin birlikte etkimesiyle meydana gelebilir. Ürün yapılarıdaki farklılık yığılım düzeninden kaynaklanır. Ancak, faz geçişi karakteristikleri birbirinin benzeridir. Şekil hafıza olayını gerçekleyen alaşımlardaki martenzitik dönüşümlerin birinci dereceden, difüzyonsuz atermal olması karakteristik özelliklerin benzer yanlarıdır. Düşük sıcaklıklarda uygulanan kesme zoru kristalografik olarak özdeş martensit varyantları arasında deformasyon ikizleri ortaya çıkarır. Östenit ve farklı martensit varyantlarının ilgilenilen domainleri, söz konusu sıcaklık aralığında kristal içerisinde bir arada bulunurlar (Morita ve ark., 2002).

Martenzitik faz dönüşümü ilk olarak Alman metalurjist A. Martens tarafından demir esaslı alaşımlarda gözlenmiş olup şekil hafıza olayının temelini oluşturmuştur (Aksu, 2006). Bu olayın ardından yapılan birçok araştırmadan elde edilen bulgular şekil hafıza olayının demir esaslı alaşımların haricinde soy metallerde, bakır bazlı alaşımlar, süper alaşımlarda, kompozit malzemelerde hatta polimer malzemelerde de görülmesi sağlamıştır (Nain, Garg, Kumar, 2018; Singh ve ark., 2018; Kumar, Sharma, Kumar, Khanna, 2018).

Metal ve alaşımlardaki faz dönüşüm olayları 2 şekilde meydana gelir. Bu dönüşümler: çekirdeklenme-büyüme ve martenzitik dönüşümlerdir. Çekirdeklenme-büyüme dönüşümü sabit sıcaklıkta termal etkileşim yoluyla difüzyon temelli olarak meydana gelirken martenzitik dönüşüm ise sistem sıcaklığının değişimi veya deformasyon uygulanarak ya da her ikisi beraber uygulanarak meydana gelir. Sıcaklık etkisiyle meydana gelen dönüşümler alaşım sistemine bağlı olarak atermal ve izotermal dönüşüm olmak üzere iki şekilde meydana gelebilir (Soğuksu, 2006; Yu ve ark., 2008; Akis, 2012).

Martenzitik dönüşümlerin genel özellikleri şu başlıklar altında özetlenebilir (Karaca ve ark., 2004; Soğuksu, 2006; Akis, 2012);

- Martenzitik faz, ara bir katı çözüldür.
- Dönüşüm olayı difüzyonsuz meydana gelir. Dolayısıyla kristal kafes deki atomların dönüşüm öncesindeki konumları dönüşüm sonrasında da korunur.
- Dönüşüm olayı, sınırlı bir şekil değişikliğiyle (kafes yapısının distorsiyonu ile) meydana gelir. Ana faz durumunda, numunenin yüzeyi parlatıldıktan sonra sıcaklığı düşürülürse yüzey üzerinde meydana gelen martenzitik faz yapısına sahip bazı bölgeler kabartılar şeklinde gözlenir. Bu sırada östenitik yapı ile martenzitik yapı arasındaki sınırda bir bozulma çizgisi ortaya çıkar. Bu bozulmalardan kaynaklanan ve martenzitik dönüşümlere eşlik eden şekil değişiklikleri şekil hafıza olayında önemli bir rol oynar.
- Martenzitik dönüşüm sonucunda bozulmamış olarak kalan ve ana faz ile ürün fazı ayıran düzleme yerleşme düzlemi (habit plane) denir.
- Östenit faz ile martenzitik faz örgüleri arasında sınırlı bir dönme bağıntısı vardır.
- Dönüşüm olayı sonucunda kristal örgü kusurları da meydana gelebilir.

Oluşumu oldukça karmaşık mekanizmalar içeren şekil hafızalı alaşımlar nihai kullanım sahasına geçiş için şekillendirme aşamasında her türlü mekanik ve ısıl zorlamalardan

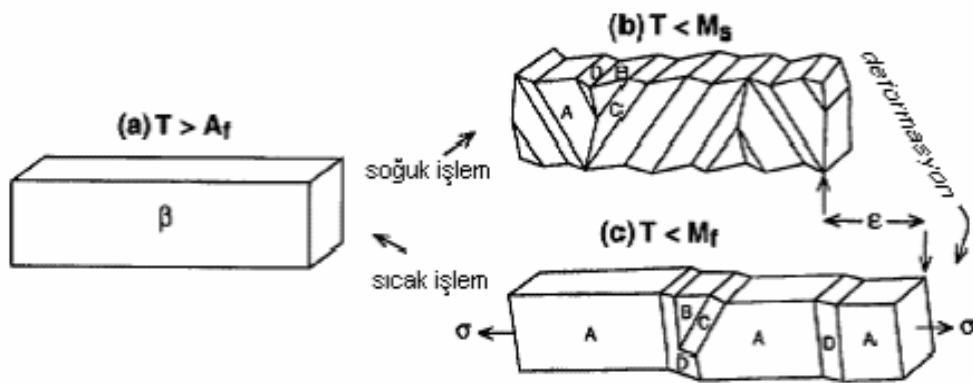
etkilenip sahip olduğu özelliği bozulabilir. Malzeme sertliğinden etkilenip mekanik zor ile kesmeyen ve ısıyı sadece kesme bölgesine uygulayarak şekillendirme işlemi yapan tel erozyonla kesme işlemi bahsi geçen malzeme için en uygun şekillendirme yöntemi olduğu öngörüsü oluşmuştur.

### 1.1.1. Şekil Hafızalı Alaşımarda Faz Dönüşümleri

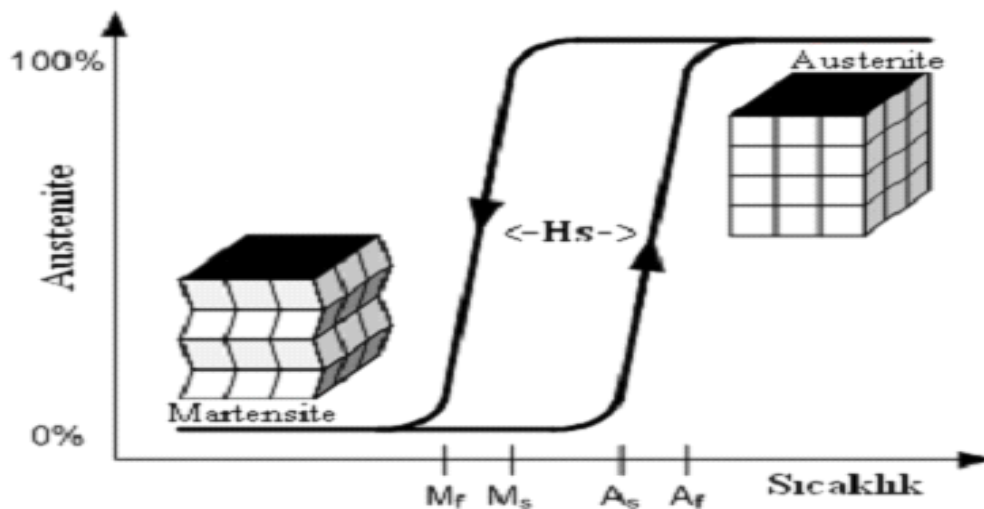
Şekil hafıza olayının temeli martenzitik faz dönüşümüne dayanır. Martenzitik dönüşüm katı alaşımlardaki bir katı-katı faz dönüşümünü ifade eder. Martenzitik dönüşüm, difüzyonsuz olarak bir kristal yapının distorsiyon edilmesi sonucu yeni bir kristal yapıya dönüşümü şeklinde meydana gelir. Difüzyonsuz martenzitik dönüşüm olayı çoğu metal ve alaşımlarda bileşiklerde gözlenmiştir. Martenzitik dönüşüm; bir örgü dönüşümü olup kesme deformasyonunu ve atomik hareketi kapsar. Martenzitik dönüşüm, metal ve alaşımlarda görülen birinci mertebeden bir yapısal faz dönüşümü olup östenit (ana faz) fazına dışarıdan uygulanan sıcaklık ve/veya plastik deformasyonun (kuvvet) etkisiyle martenzit fazın elde edilmesi olayıdır (Soğuksu, 2006).

Martenzitik dönüşüm olayları termo-elastik ve termo-elastik olmayan dönüşümler olarak iki grupta incelenebilir (Soğuksu, 2006). Bu iki dönüşüm arasındaki fark dönüşüm histerezisinden kaynaklanır. Termoelastik dönüşümlerde histerezis dar ve dönüşüm yüzdesi yüksek, termoelastik olmayan dönüşümlerde ise, histerezis geniş ve dönüşüm yüzdesi küçüktür. Termoelastik olmayan dönüşümde ise; soğutma sırasında oluşan bir martenzit plakası belli bir büyüklüğe kadar gelir fakat soğutma devam etse dahi plakalarda büyüme olmaz. Sabitlenmiş ara yüzey ısıtma sırasında geri hareket etmez. Bunun sonucunda ana faz, sabitlenmiş martenzit plakalar arasında çekirdeklenir ve bir plakanın tamamı orijinal ana faz yönelimine geri dönemez. Termo-elastik olmayan faz dönüşümü, soğutma işlemi sırasında ani bir patlama reaksiyonuyla atermal olarak ana faz içinde difuze olarak (yayınım yoluyla) gerçekleşmektedir (Aydoğdu, 1995). Termo-elastik olmayan bir dönüşümle gerçekleşen martenzitik yapı sıcaklık düşüşüyle büyümez, fakat yeni martenzit bölgeleri oluşur. Termoelastik dönüşümle oluşan martenzitik yapılar ise süreklilik göstererek sıcaklık düşüşüyle büyürler. Şekil hafıza olayı gösteren termoelastik faz dönüşümleri, düzenli bir yüksek sıcaklık fazından, yüksek simetri fazı, kristalografik olarak tersinir bir termo-elastik dönüşüm ile düşük sıcaklık fazına, yani düşük simetri fazına bir geçiş gösterir (Aydoğdu,1995).

SMA'lar genel olarak termo-elastik faz dönüşümü sergilerler. Çünkü bu alaşımların büyüme kinetikleri ve dar histerisize sahip olmaları, şekil hafıza olayı için gereklidir (Soğuksu, 2006).  $M_s$  (Martenzit başlama) sıcaklığında başlayan martenzit plakaların oluşması,  $M_f$  (Martenzit bitiş) sıcaklığında %100 martenzit plakaların oluşumu ile son bulur. Bunun tersine, ısıtma ile beraber  $A_s$ , östenit başlama sıcaklığı ile başlayan ana faza geçiş,  $A_f$ , östenit bitiş sıcaklığı ile son bulur. Şekil 1.1'de martenzit dönüşüm mekanizması gösterilmiştir. Şekil 1.2'de ise, martenzit dönüşüme bağlı olarak oluşan şekil hafıza süreci gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Martenzitik dönüşüm. a) Östenit fazda  $\beta$  fazlı kristal, b) Martenzitik dönüşüm sonrasında oluşan ikizlenme A, B, C ve D varyantları, c) Baskın A varyantı (Aydoğdu, 1995).



Şekil 1.2. Sıcaklık değişim ve martenzitik dönüşüme bağlı histerisiz (H) değişim grafiği (Gökdemir, 2006).

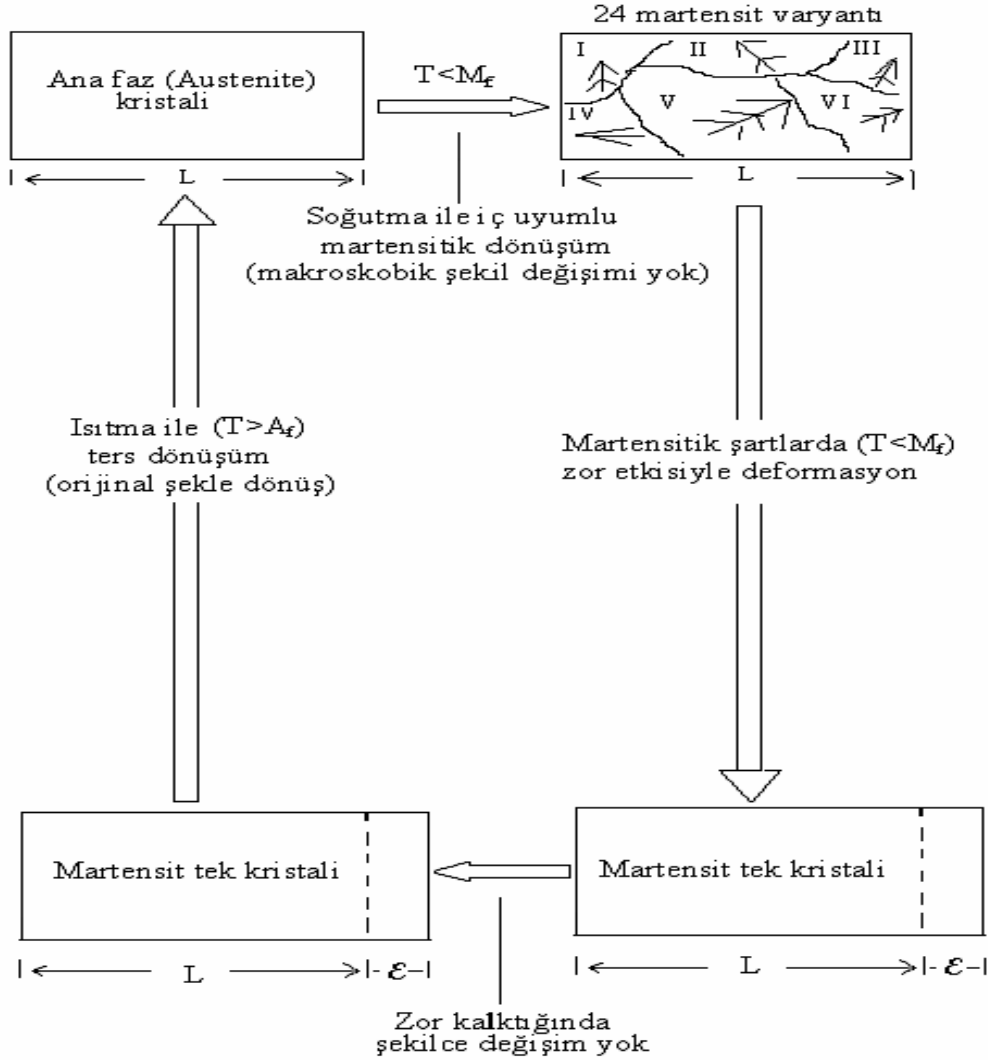
### 1.1.2. Şekil Hafıza Mekanizmasının Oluşumu

Şekil hafıza olayı günümüzde endüstride yaygın bir kullanım alanı bulunduğundan şekil hafıza mekanizmasının iyi bilinmesi büyük önem arz etmektedir. Termoelastik martenzit dönüşümleri ve buna bağlı olarak da Şekil hafıza olayı ilk defa Au-Cd alaşımlarında Chang ve read tarafından tespit edilmiştir. 1938 yılında ise Greninger ve Mooradian bu dönüşüm olayının CuZn malzemelerde de olduğu saptanmıştır. Bu tespitlerin akabinde 1951 yılında AuCd alaşımı ve 1953’de NiTi alaşımında da bu dönüşüm tespit edilmiştir. Ancak şekil hafıza olayının laboratuvar ortamlarından uygulamalarda kullanılmasına geçiş 1963 yılında eşit atomik yüzdeli NiTi alaşımı ile gerçekleşmiştir (Hodgson, 2002; Akdoğan, 2004; Toptaş ve Akkuş, 2007). Günümüzde de en yaygın kullanım alanı bulunan NiTi (Nitinol)’dir (Michalz, 2001; Majumder ve Maity, 2018). Daha sonraki araştırmalarda büyük ölçüde soy metal bakır bazlı alaşımlarda ve başka alaşımlarda da bu olayın gerçekleştiği gözlenmiştir (Kayalı, 1993). Şekil hafıza olayındaki martenzit→östenite (M→A) ters dönüşümü esnasında kullanılabilir bir kuvvet açığa çıkar. Termal çevrim işlemiyle, şekillerini tersinir olarak geri kazanabilme özelliklerini kendilerince yapabilmeleri ve bu olay sonucunda kullanılabilir kuvvet üretebilmeleri nedeniyle, bu eşsiz alaşımlar teknolojik uygulamaların ilginin odağı haline gelmiş ve üzerinde çok sayıda araştırma yapılması her geçen gün artmaktadır (Soğuksu, 2006).

Şekil hafıza özelliği Eskin ve ark. (2014) tarafından malzemenin martenzitik fazda iken deforme edilmesi durumunda sonra östenit faz sıcaklığına kadar ısıtıldığında eski (östenit fazda iken) sahip olduğu ilk şeklini hafızası olayı şeklinde tanımlanmıştır (Eskin, Seval, Akis, 2014). Malzemenin deformasyonundan sonra tekrardan ilk şekline dönmesi malzemenin önemli bir yeteneğini ifade eder. Şekil hafıza etkisinin ortaya çıkmasına, ısıtma veya soğutma işlemleri süresince belirli bir sıcaklık aralığında oluşan yapısal değişimler neden olmaktadır.

Şekil hafıza olayı alaşımın termo-elastik dönüşüm yetisi ile ilgilidir. Termoelastik dönüşümler sonucunda sadece orijinal kristal yapı ve yönelim eski halini almaz mikro yapı da eski haline geri döner. Bu tür dönüşümlerde, sıcaklığın indirilmesi ile martenzit plakaları oluşup büyürler. Oluşan martenzit plakaları soğutma işleminin devam ettirilmesi ile birbirlerine ya da tane sınırına ulaşıncaya kadar büyüme işlemi devam ederler. Sıcaklık

artırıldığında ise ara yüzeyin geri dönük hareketiyle oluşmuş olan martenzitik oluşumlar büzülerek ana faz (östenit) dönüşür (Eskil, 2006).



Şekil 1.3. Şekil hafıza olayının mekanizması (Eskil, 2006).

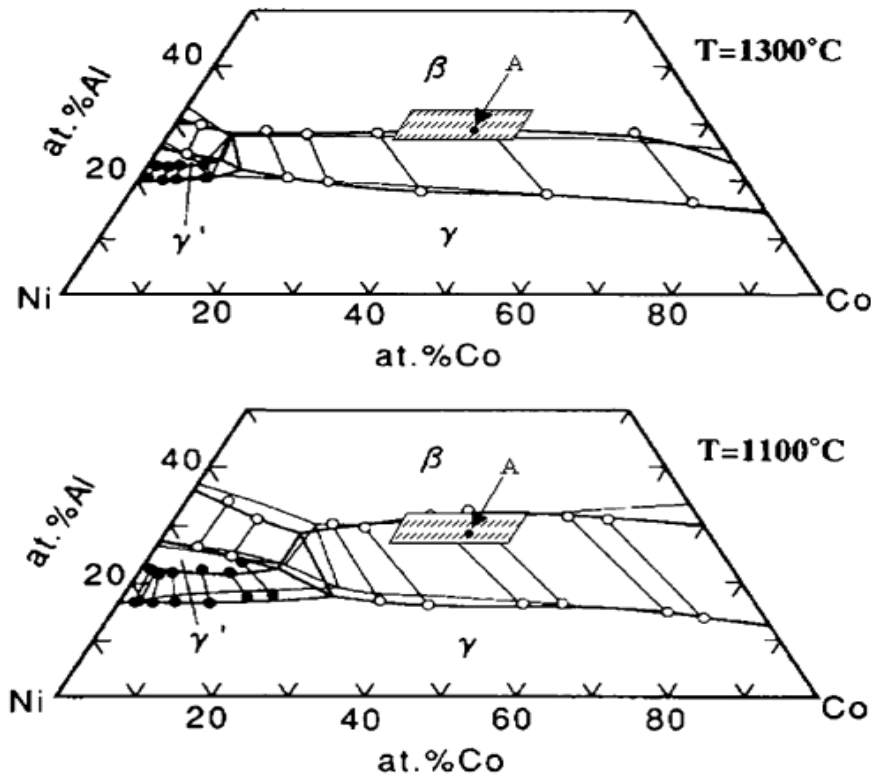
Şekil hafıza olayı gözlenmeyen alaşımlardaki martenzitik dönüşümlerde ise şekil hafızalı alaşımlardan farklı olarak soğutma sırasında oluşan martenzit plakaların büyüme yüzdesi sınırlıdır. Oluşan bu martenzit plakalar yapı içinde sabitlenmiş olarak kaldığından malzeme ısıtılrsa dahi oluşan plakalar östenit faza dönüşmez. Yani şekil hafızanın gözlenebilmesi için faz dönüşüm yüzdelерinin yüksek olması gereklidir. Dolayısıyla termoelastik dönüşüm sergilemeyen malzeme grupları şekil hafıza etkisine sahip değildir (Çavdar, 2006).



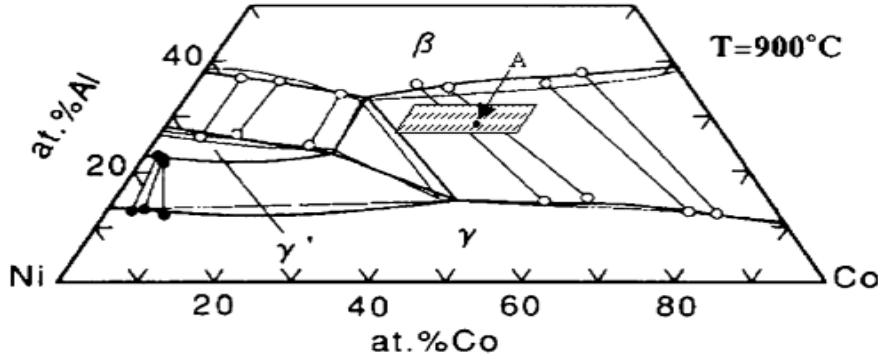
### 1.1.3. Kobalt Esaslı Şekil Hafızalı Alaşımlar

Endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanım alanı bulunan Nikel-Titanyum ve bakır esaslı alaşımların kimyasal içeriklerindeki elementleri pahalı olması dolayısıyla bu alaşımlara kıyasla daha ucuz olan CoNiAl, NiMnGa ve NiFeGa gibi yeni tip şekil hafızalı malzemeler gelişimine zemin hazırlamıştır (Chumlyakov, 2008; Nespoli, Biffi, Villa, Tuissi, 2017; Gerstein, 2018). Bu alaşımlar arasında ise termal uygulamalar boyunca şekillendirilmek için yeterli sünekliliğe sahip olması, dönüşüm ve Curie sıcaklığının düzenlenebilmesi gibi özellikleri sebebiyle CoNiAl alaşımları diğer alaşımlara göre bir adım öne çıkarmaktadır.

Şekil 1.4'de CoNiAl alaşımının faz diyagramı verilmiştir. Şekil 5'de görüldüğü üzere CoNiAl üçlü faz sisteminde Al oranı arttırıldığında  $\beta$  faz bölgesinden uzaklaşılır. Dolayısıyla termoelastik martenzitik dönüşüm ortaya çıkmaz ve fazının çökmesi hızlı soğutmayla da önlenemeyebilir (Akis, 2012).



Şekil 1.4. CoNiAl alaşımlarının faz diyagramları (Eskil, 2006).



Şekil 1.4. (Devam)CoNiAl alaşımlarının faz diyagramları (Eskil, 2006).

CoNiAl alaşımları, geniş bir sıcaklık ve kompozisyon aralığında  $\beta$  fazı ile kararlı olan Al tip  $\gamma$  fazına sahiptir.  $\gamma$  fazının miktarı biçimi ve dağılımı martenzitik dönüşüm üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. CoNiAl sistemleri, kimyasal bileşime bağlı olarak  $\beta$  östenit (B2 kübik) fazından,  $L1_0$  (tetragonal) martensite dönüşürler. Polikristal malzemedeki tek  $\beta$  fazı son derece sert ve gevrek bir yapıya sahip iken yüzey merkezli kübik yapıya sahip olan (fcc) ikincil  $\gamma$  fazı ise sünektir. Öte yandan, yüksek sıcaklıklardan soğuma sonucu CoNiAl alaşımları termoelastik martenzit dönüşümünün gerçekleşmesi ile paramagnetik yapıdan ferromagnetik yapıya geçerler (Akis, 2012).

Şekil hafızalı alaşımlar için faz dönüşüm sıcaklıkları çok önemli parametrelerdir. Bu dönüşüm sıcaklıklarından özellikle  $M_s$  sıcaklığının oda sıcaklığı civarında olması çok önemlidir. Faz dönüşüm sıcaklıkları genel olarak mikro yapı farklılıkları ve malzemeye uygulanan farklı işlemlerden etkilenebilirler (Eskil., 2006). Co-Ni-Al alaşımlarında  $M_s$  sıcaklığı, tavlama sıcaklığı arttıkça yükselir [8].

Yapısal dönüşümün yanında, CoNiAl alaşımlarında paramagnetik düzenden antiferromagnetik düzene magnetik bir dönüşüm söz konusudur. Bu dönüşümün gerçekleştiği sıcaklığa Curie sıcaklığı ( $T_C$ ) adı verilir.  $T_C$  sıcaklığının,  $M_s$  sıcaklığına göre durumu dönüşüm davranışını ve şekil hafızalı etkisini değiştirebilir. CoNiAl alaşımları için Paramagnetizma→antiferromagnetizma dönüşümü, ikinci dereceden bir dönüşüm olduğundan (hacim genişlemesi vb. sonuçlar yoktur) uygulanan zor ile ilişkisi yoktur. Bu yüzden uygulanan zor direkt olarak dönüşümü etkiler.

Ferromagnetik şekil hafıza olayında önemli olan ikinci bir etkende zor ile elde edilen martenzitik dönüşüme dış magnetik alan uygulanarak şekil değişimi elde etmektir. Zor etkili martenzitik dönüşüm yalnızca  $M_s$  sıcaklığının biraz üstündeki sıcaklıkta meydana gelir. Uygulama sıcaklığı arttırıldığında martenzitik dönüşüm oluşmazsa, uygulanan zor arttırılır ve martenzitik dönüşüm gerçekleşmiş olur.

Şekil hafızalı alaşımlarda martenzitik dönüşüm olayının termoelastik olması; alaşımda sıcaklığın düşmesi sonucu martenzit plakaların oluşması ve büyümesi, sıcaklığın yükselmesi ile ise büyüme yönünün tam tersi yönde kaybolması olarak açıklanabilir. Bu alaşımlarda yüksek sıcaklıkta kararlı olan östenit fazı bulunur iken düşük sıcaklıkta kararlı olan farklı bir kristal yapısına sahip martenzit fazı bulunmaktadır. Co bazlı alaşımlarda  $A_s$  -  $M_s$  arasındaki fark ne kadar az olursa alaşımların termoelastiklik özelliğinin o kadar iyi olduğu belirtilmiştir (Liu ve ark. 2004).

CoNiAl alaşımlı şekil hafızalı malzemeler birçok alanda kullanım alanı bulmaları ile birlikte bu alaşımların kullanım alanları dört ana başlık altında toplanabilir. Bunlar sırasıyla tıbbi uygulamalar ve endüstrisi, uzay ve havacılık endüstrisi, endüstri ve teknolojisi, otomotiv endüstrisi ve diğer uygulamalar olarak gruplandırılabilir. Bu alaşımların spesifik kullanım alanlarından örnek vermek gerekirse mekanik araçlarda yay malzemesi, türbin motoru, robotik aletler ve klima sanayinde performans arttırıcı vb. uygulamalar verilebilir. Bundan dolayı yeni geliştirilen bu malzemelerin nihai kullanım alanlarında mevcut karakteristik özelliklerini kaybetmeksizin yapılacak şekillendirme çalışmaları büyük önem arz etmektedir.

## 1.2. Tel Erozyon Yöntemi

Geleneksel yöntemlerden farklı olarak modern imalat yöntemleri, göreceli hareket, fiziksel temas ve kesme kuvveti uygulamadan, çeşitli enerji türlerini (ısı, titreşim, kimyasal, elektrokimyasal enerjisi, vb.) kullanarak malzeme aşındıran, işleyen veya şekillendiren yöntemlerdir (Muthuramalingam ve ark, 2018). Elektro-termal enerji kullanarak kesme yapan, tel erozyon yöntemi, elektro erozyonla işlemenin (EDM) özel bir şekli olarak modern imalat yöntemlerindedir. Son yıllarda özellikle havacılık, nükleer ve otomotiv sanayilerinde bu yöntemle şekillendirme ve kesme uygulamaları sıkça görülmektedir (Singh ve ark, 2018; Yanling, 2018). Konvansiyonel tezgâhlarla işlenmesi

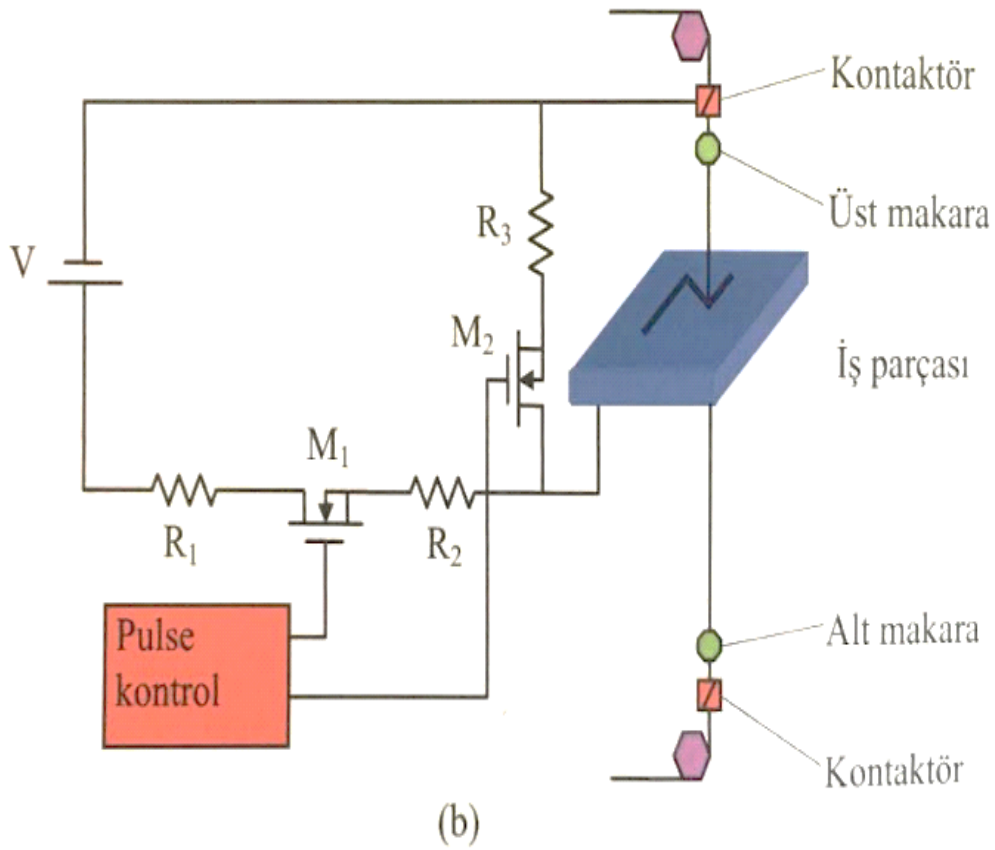
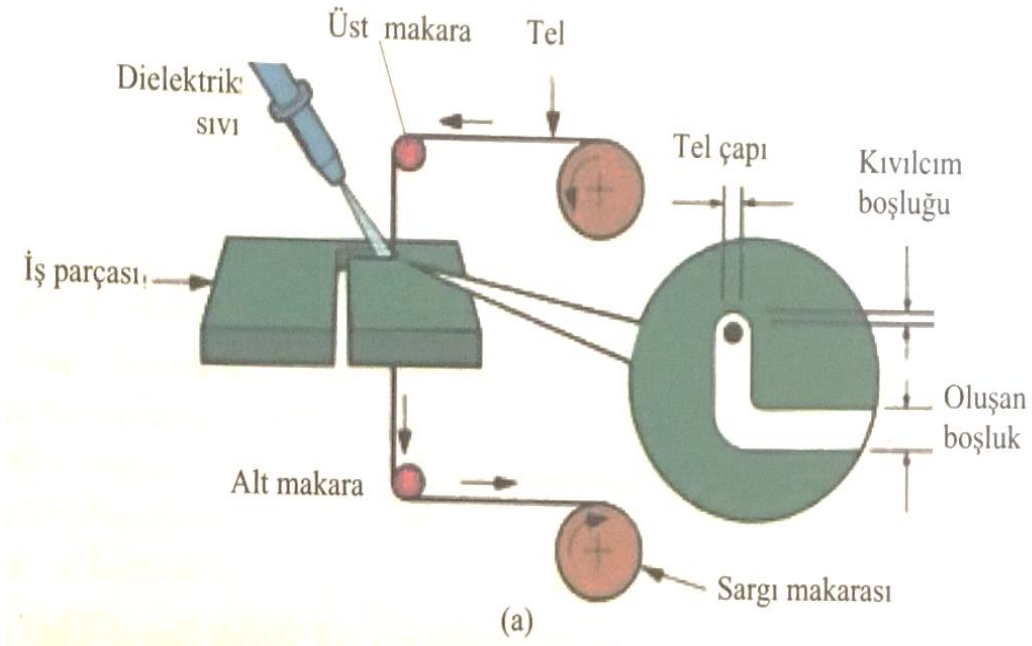
mümkün olmayan çok sert ve karmaşık şekilli malzemeler bu yöntemlerle kolaylıkla işlenebilmektedir.

### 1.2.1. Tel Erozyon Çalışma Prensibi

Üç boyutlu karmaşık geometrili parçaların büyük bir kısmı, modern imalat yöntemlerinden olan tel erozyon tezgâhlarında, elektrot olarak kullanılan tel gibi çok basit bir takım yardımı ile imal edilebilmektedir. İşlenen ve işleyen malzeme çiftlerinin uygun seçilmesi, bu yöntemle 300 mm<sup>2</sup>/dak'lık kesme hızlarına ve hatta daha yüksek değerlere ulaşılabilmesini sağlamaktadır. İmalatta kullanılan metallerin artan mekanik özellikleri, bu yönteme olan ihtiyacın artmasına dolayısıyla bu teknolojinin gelişmesine olanak sağlamaktadır (Nain, 2018).

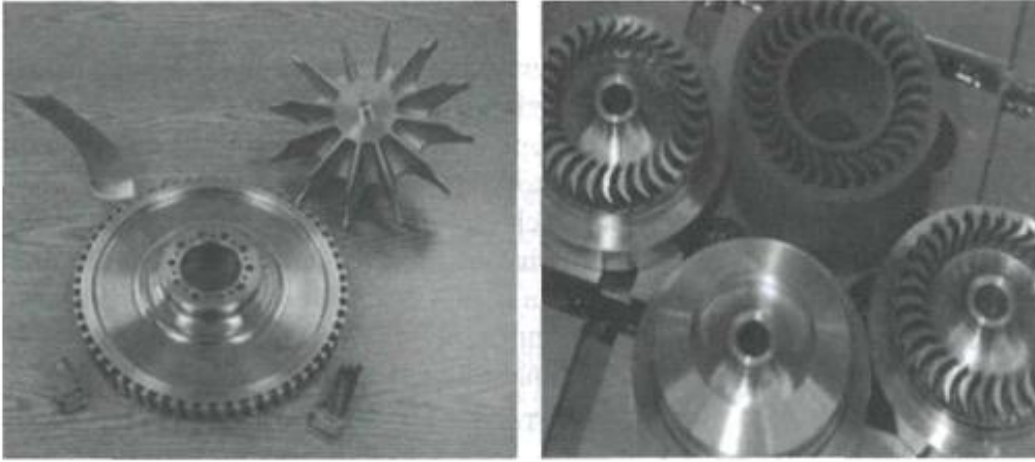
Tel erozyon yönteminde, elektrot olarak kullanılan tel ile iş parçası farklı elektriksel kutuplara bağlanır. İş parçasına yaklaştırılan elektrot telden geçen enerji, elektriksel boşalmalarla, iş parçasından kesilmek istenen kesitte yüksek bir sıcaklık meydana getirmektedir. Yüksek sıcaklık sonucu eriyen metal parçacıklar buldukları yerden ayrılarak kesme işlemi gerçekleştirilmiş olur (Mussade, 2018). İş parçasına nispeten iletkenliği iyi olan, genellikle pirinç ve tungsten'den imal edilen elektrot teller, kesme işleminde sürekliliğini sağlamak ve işlem anında aşınan tellerin yerlerine yeni tel kesitlerinin gelmesi için makaralara sarılırlar. Genellikle işlem görmeyen elektrot tellerin makarası iş parçasının üst kısmında, işlem gören tellerin makarası ise iş parçasının alt kısmında yer alır. Kesme işleminin sağlıklı olması için makaralar arasında ideal bir gerginliğin olması gerekmektedir. Kesme işleminde istenen geometrinin durumuna göre kullanılan tel çapları 0,050-0,254 mm arasında değişiklik göstermektedir. Kesme kalınlığı 70-80 mm kadar olan iş parçaları bu yöntemle işlenebilir.

Kesme işleminde istenen geometrik hassasiyet, tel elektrotu hareket ettiren mekanizmaların hassasiyetlerine bağlıdır. Bu hassasiyeti sağlamak için bilgisayar destekli kontrol sistemlerinin ve bilyeli yatakların kullanıldığı tezgâhların tercih edilmesi gerekir (Gavvas, 2016). Dielektrik sıvı olarak genelde iyonlaştırılmamış su kullanılır. Talaş kaldırma hızını, talaş kaldırmak için uygulanan enerji miktarı ve enerji uygulanırken oluşan kıvılcımların sıklığı etkiler. Şekil 1.5'de tel erozyon kesme yönteminin teorik çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 1.5. Tel erozyon ile işleme, (a) işlemin şematik olarak gösterilmesi, (b) işlemin elektrik devresi (Gavas, 2016).

Tel erozyonla kesme işlemi, sertlik ve mukavemet gibi mekanik özellikleri üst seviyede olması gereken zımba ve kalıp yapımının yanında dişli ve kanatçık yapımında da sıklıkla kullanılmaktadır. Bu metotla imal edilen bazı makine elemanları Şekil 1.6'da görülmektedir.



Şekil 1.6. Tel erozyonla işlenmiş parçalar (Gavas, 2016).

### 1.2.2. Tel Erozyon İle Kesme İşleminde İşlem Parametreleri

Tel erozyon imalat yöntemi ile alakalı kesme parametrelerinin malzemelere etkileri konusunda genel ve birçok spesifik çalışma mevcuttur. Tel erozyonda işlenen bir malzeme yüzeyinin mikro ve makro düzeydeki görünümü ve mekanik özellikleri doğrudan işleme parametreleriyle bağlantılıdır. Aşağıda bazı parametreler ve etkilerinden kısaca bahsedilecektir.

#### Vurum Süresi ( $T_{on}$ )

Birimi mikro saniye olan vurum süresinde talaş kaldırma gerçekleşmektedir. Bu sürede uygulanan enerji yoğunluğu talaş miktarını etkilemektedir. Bu enerji tel elektrottan geçen akım ve uygulanan gerilimin yanında vurum süresi uzunluğuyla alakadardır. Vurum süresinin artırılması oluşan enerjiyi artıracığından iş parçasından kaldırılan talaş miktarını da doğru orantılı şekilde artıracaktır. Fakat artmış olan enerji yoğunluğu, yüzeyde derin ve geniş kraterler oluşmasına sebep olacaktır. Dolayısıyla artan enerji yoğunluğu bozulan yüzey kalitesi olarak karşımıza gelecektir. Ayrıca artan vurum süresi iş parçası üzerinde

daha fazla ısı girdisi anlamına gelmektedir. Artan ısı girdisi iş parçası yüzeyinden iç kısımlara doğru ısıdan etkilenen bölgenin büyümesine ve beyaz tabaka olarak bilinen yeniden kristalleşen tabakanın kalınlaşmasına sebep olacaktır (Roy, 2018).

#### Vurum Ara Süresi (Toff)

Elektrotlar arasında enerjinin uygulanmadığı süre olarak bilinen bu parametre işleme üzerinde önemi büyüktür. Bu süre zarfında iş parçasından ergitme yöntemiyle çıkarılmış parçacıkların kesme bölgesinden uzaklaştırılır. Gerekenden az verilen vurum ara süresi, kesme bölgesinden uzaklaştırılması gereken parçacıkların yerlerinde kalarak elektrot tel ile kısa devre oluşmasına ve telin kırılmasına sebep olacaktır. Bunu önlemek için gereksiz artırılan vurum ara süresi kesme işleminin gereksiz yavaşlaması sonucunu ortaya çıkaracaktır. Vurum ve vurum ara süresi bir birinden etkilenen iki parametre olduğundan beraber ele alınmalıdır. Vurum süresi, vurum ara süresinden daha fazla olmalıdır (Mohapatra, 2017).

#### Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı (IP)

Tel erozyon yönteminde kullanılacak enerjinin miktarını kontrol eden bir parametredir. Birimi Amper olan bu parametrenin değeri kesme yüzeyinin kalitesiyle ilişkilidir. Yüksek akım değeri kesilen malzeme yüzeyinin daha pürüzlü ve kesme kanalının daha geniş olmasına sebep olmaktadır. Akım değerinin düşürülmesi tel aşınma hızını azalttığı gibi iş parçasının yüzey kalitesini artıracaktır. İşlem süresi ve yüzey kalitesi gibi bir birine zıt iki çıktının optimize edilmesi sonucu ayarlanması gereken bir parametredir (Ay, 2010).

#### Ana Güç Kaynağı Voltajı (V)

Ana güç kaynağı voltajı (V) tele uygulanan gerilimdir. Elektrot telden geçen akımla beraber talaş kaldırma enerjisini ayarlar. Telde oluşan enerjinin kaba ayarları akımla olurken ince ayarlamalar voltaj ile yapılmaktadır. Aynı zamanda voltaj iş parçası kalınlığının bir fonksiyonudur. Kalın iş parçaları için daha yüksek bir voltaj değeri, ince parçalar için daha düşük bir voltaj değeri kullanılması tavsiye edilmektedir (Yusoff, 2018).

### Tel Gerilmesi (WT)

Tel erozyonla kesme işlemi testere ile kesmede olduğu gibi iş parçasının dışından içeriye doğru olabilirken özellikle kalıp imalatında iş parçasının delinen bir kısmından girerek kesme işlemi yapılmaktadır. Tel elektrot, iş parçası üzerindeki başlama deliğinden geçirilerek iki makara arasında tele gerginlik verilmektedir. Tel gerginliği 380-2200 gr arasında değişmektedir. Kesilen yüzeyin pürüzlüğü düşük istenirse, tel elektrotun gerginliği en üst seviyede (telin kopma limitinin altında) olması gerekir.

### Tel İlerleme Hızı (WS)

Tel ilerleme hızı malzeme kalınlığına göre ayarlanır. Malzeme kesit kalınlığı arttıkça, tel kırılmasının önlenmesi ve tel düzgünlüğünün sağlanabilmesi için tel hızının artırılması gerekmektedir. Tel hızının azalması, kesme işlemi sürecinde oluşan tel aşınmalarından dolayı telin iş parçasına girdiği çap ile iş parçasından ayrıldığı çapın arasındaki farkın artmasına ve dolayısıyla, iş parçasının kesme yüzeyinde konikliğin oluşmasına ve telin kopmasına neden olmaktadır (Mohapatra, 2017).

### Tabla İlerleme Hızı (SF)

Tabla ilerleme hızı, kesici tel elektrotunun iş parçasına göre yaptığı ilerlemeye denir. Birimi mm/dak olan tabla ilerleme hızı, iş parçasının kesit kalınlığı, tel elektrota uygulanan voltaj, elektrottan geçen akım gibi parametrelere bağlı olarak optimize edilmesi gereken bir parametredir.

### Dielektrik Sıvısı Sirkülasyon Basıncı

Kesme anında, iş parçasından ergiyerek dökülen kırıntı ve katı metal partiküllerinin kıvılcım boşluğu boyunca hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamak için kullanılır. Atık partikülleri uzaklaştırma işlemini yerine getirebilmesi için sıvının ideal basınçta olması gereklidir. Bahsi geçen sıvı kesme işlemi sürecinde elektrot ile iş parçası arasında enerji aktarım vazifesinin yanında tel elektrot boyunca uygulanarak tel elektrotun soğumasını sağlamaktadır. İdeal sıvı basıncı aşılarak yapılan uygulamada tel elektrotun kopmasıyla



sonuçlandırılırken ideal basıncın altında yapılan uygulamada ise yeterli soğutma yapılamadığından kesme verimi azalacaktır (Hasçalık, 2006).

### **1.2.3. Elektro erozyon ile işlemenin avantajları ve dezavantajları**

Gelişen teknolojiyle çeliklerden istenen mekanik özellikler artmıştır. Artan mekanik özelliklere sahip olan iş parçaları geleneksel metotlarla işlenemez hale gelmiştir. Elektriksel iletkenliği iyi olan metal, alaşım ve karbür gibi çok sert malzemelere elektro erozyonla işleme uygulanabilir.

Geleneksel yöntemlerde talaş kaldırmak için takımın iş parçasına uyguladığı yüksek kesme kuvvetinden dolayı iş parçasında meydana gelen çarpılma olayları bu yöntemde, kesme kuvvetinin sifıra yakın olmasından dolayı ihmal edilecek seviyededir. Ayrıca kesme kuvvetinin ihmal edilecek seviyede az olması narin ve kırılğan iş parçalarının da işlenmesine olanak sağlamaktadır.

Kesme işlemi sonrası iş parçasının kesilen kenarların da çapak oluşmaz. Kesme işlemi sonrası kesilen yüzeyde beyaz tabaka diye isimlendirilen yeniden kristalleşmiş tabaka meydana gelir. Bu tabaka ana malzemeye göre daha sert ve kırılğan olur. Bu tabakanın kalınlığı kesme işlemi sürecinde uygulanan enerji miktarı ve ana malzemenin ısı iletimine göre farklılıklar göstermektedir. Beyaz tabakanın oluşumu ve kalınlığı iş parçasının kullanım yerine göre olumlu veya olumsuz sonuçlar verebilir.

Oda sıcaklığında gevrekleşmeye meyilli iş parçalarının, tel erozyonla işlenmesi sürecinde azda olsa meydana gelen ısı, termal gerilmeler meydana getirir. Bu termal gerilmeler sonucu iş parçası yüzeyinde kılcal çatlaklar oluşabilir. Oluşan kılcal çatlakların giderilmesi için parçaya elektro erozyonla işleme sonrasında diğer finiş işlemleri uygulanmalıdır. Özellikle parça yorulma gerilmelerine maruz kalacak ortamda çalışacaksa bu finiş işlemi mutlaka uygulanmalıdır (Gavas, 2016).

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatür araştırması Şekil Hafızalı Malzemeler ve Tel Erozyon yöntemindeki çalışmalar şeklinde iki kısımda verilmiştir.

### 2.1. Şekil Hafızalı Malzemeler

Şekil hafızalı malzemeler üzerinde çalışmalar 1930'lu yıllarda başlamış olup o günden günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar ise farklı alaşım elementleri ile yeni malzemelerin oluşturulması, mekanik ve termal etkiler altında şekil hafızalı özelliklerinin incelenmesi, soğutma hızının etkileri ve çökelti kinetikleri üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak bu malzemelerin kesimi üzerine çalışmalara henüz yeni bir olgu olup sadece NiTi alaşımları üzerindedir (Majumder ve Maity 2018; Divya, Hargovind, Narendranath S., 2018).

Bu kısımda literatürde yer alan şekil hafızalı alaşımlar ile ilgili çalışmalar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Termoelastik martenzitik dönüşümler ve buna bağlı olarak da şekil hafıza olayı ilk defa 1932 yılında Chang ve Read tarafından anlaşılmış ve bu olay 1951 yılında Au-Cd alaşımında gözlemlenmiştir. Ancak şekil hafıza olayının endüstriyel uygulamalarda kullanımı, 1963 yılında Buehler ve arkadaşları tarafından eşit atomik yüzdeye sahip Ni-Ti alaşımıyla uygulanmıştır (Işık, 2007).

Enami ve Nenno (1971) Ni-36.8 At. Pct Al martenzite şekil hafıza özelliği olduğunu tespit etmişlerdir. Kainuma ve ark. (1996) (B2) + $\gamma$  Ni-Al-Fe alaşımının termoelastik martenzitik dönüşüm sergiledikleri ve Co katkısının artması sonucunda martenzitik dönüşüm sıcaklığının azaldığını tespit etmişlerdir.

Xu ve ark. (2006) kobalt bazlı şekil hafızalı alaşımlar üzerinde çalışmalar yapıldığı CoNi, CoNiGa ve CoNiAl alaşımlarının ısı işlemler yoluyla martenzitik dönüşümleri yapılarak şekil hafıza özelliği kazandırılabilirdiğini belirtmişlerdir. CoNiAl şekil bellekli bu

alaşımların tıbbi endüstri ve teknolojisi, uzay ve havacılık endüstrisi, otomotiv endüstrisi gibi önemli endüstri kollarında kullanıldığını belirtmişlerdir (Xu Guo ve ark., 2006).

Tanaka ve ark. (2006) Co-39Ni-31Al alaşımının farklı sıcaklıklarda XRD analizlerini çalıştıkları çalışmada oda sıcaklığında baskın fazın ana faza ait B2 fazını, düşük miktarlarda da  $\gamma$  (yumuşak fcc) fazını tespit etmişlerdir.  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $-198\text{ }^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklıklarda yapılan XRD analizlerinde ise L10 yapılı spektrumlarla martensit dönüşümün sağlandığını tespit etmişlerdir.

Mariaz (2008) Co-Ni-Al alaşımının iyi sünekliliğe sahip olmasından dolayı Ni-Mn-Ga ve Ni-Fe-Ga alaşımlarına alternatif olarak kullanıldığını belirtmiştir. Bu alaşımın Curie sıcaklığı ( $T_c$ ) ve özellikle martensit dönüşüm sıcaklığı ayrı ayrı, değişen Co ve Al oranı ile  $-150$  ile  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  aralığında kontrol edilebilir olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca bu alaşımın kimyasal kompozisyonunun Al %20-%30, Co için ise %40'dan az olmasını önermiştir.

Zhang ve ark. Çift fazlı Co-Ni-Al-Ga alaşımlarının mikro yapı ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında Co-Ni-Al ve Ni-Fe-Al ferromanyetik alaşımların düzenli intermetalik alaşımlar içermelerinin yanında iyi oksidasyon direnci, yüksek güç ve yüksek süneklilik özelliklerine sahip olduklarını tespit etmişlerdir.  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  de hızlı soğutulan Co50-Ni30-Ga20 alaşımında  $\gamma'$  fazı çubuk morfolojisinde olduğu fakat Ga oranı % 25 e çıkarıldığında ise Widmanstätten morfolojisine sahip yapıların gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Bu alaşımlarda tespit edilen baskın XRD piklerinin L10 olduğu düşük miktarlarda ise Al tipi  $\gamma$  fazları tespit edilmiştir.

Liu ve ark. (2006) CoNiAl- Co-Ni-Ga alaşımlarının  $1300-1100$  ve  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de üçlü faz diyagramlarını çizmişlerdir. Co-Ni-Al alaşımlarında Al oranının yüksek olmasıyla  $\beta$  faz bölgesinden uzaklaşıldığı, termoelastik martenzitik dönüşümün ortaya çıkmadığı ve hızlı soğuma ile  $\gamma$  fazı çökmesinin önlenemeyeceğini belirtmişlerdir.

Co bazlı alaşımlar üzerine termal yaşlandırma etkileri çalışılan konulardan bir tanesidir. Yaşlandırma olayı ana fazda ve martenzit fazda olmak üzere iki şekilde uygulanır. Yaşlandırma işleminin ana fazda veya martenzit fazda uygulanmasının şekil hafıza derecesini önemli ölçüde etkiler (Lam ve diğ. 1997). Co bazlı alaşımlarda ana fazda termal yaşlandırma işlemi çökelti fazlarının meydana gelmesi ve soğutma sonrası düzen

derecesinin bozulması sonucu olumsuz etkilere neden olabilir (Maziarz ve ark. 2008). Co bazlı şekil hafızalı alaşımlar düşük sıcaklık yaşlandırma etkilerine karşı hassastırlar. Dolayısıyla bu alaşımların dönüşüm davranışları yaşlandırma yoluyla değiştirilebilir (Chumlyakov, 2004).  $M_s$  değerindeki değişimler, ya  $M_s$  üzerindeki yaşlandırma işlemlerinden ya da alaşımın  $M_s$  üzerinde farklı soğutma işlemlerine tabi tutulmasından kaynaklanır (Xu ve ark., 2006).  $A_s - M_s$  arasındaki fark azaldıkça alaşımın termoelastiklik kalitesi artar (Akis ve ark., 2011).

Corneliu ve ark. (2002) Kobalt bazlı ferromanyetik tek kristalli ve çok kristalli Co-Ni-Ga ve Co-Ni alaşımlarını Heusler tipi bileşimin aralığında üretmişlerdir. Ardından bu alaşımların elastomekanik özelliklerinin tavllanmış ve soğutulmuş şekilde incelemişlerdir. Mekanik inceleme sonuçları Martenzitik faz aralığı ve dönüşümlerinin alaşımın durumu (tavlanmış veya soğutulmuş) ve kimyasal bileşimine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Optik ve elektron mikroskopu incelemelerinden tipik termoelastik martenzitik faz dönüşümünün meydana geldiğini belirtmişlerdir. Soğutma ile B2 ana fazının monoklinik ve ortorombik martenzite dönüştüğünü belirtmişlerdir. Düşük Ga içerikli alaşımlarda Kobaltça zengin fazın oluştuğu ve düşük Ga içeriğinin tavllanmış ve soğutulmuş alaşımlardaki dönüşüm aralılarındaki farklılığın sebeplerinden birinin olduğunu belirtmişlerdir.

Rebecca ve ark. (2016) Co-Ni-Al, Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Ni şekil hafızalı çok kristalli alaşımlarındaki taneler arası kırılma olumsuzlukları (sünek bir katı çözelti fazı yoluyla) taneler arası çökelti yoluyla olumsuzlukları gidermeye çalışmışlardır. Bu alaşımların dönüşüm aralıklarının geliştirilmesi amacıyla ısı işlem şartları ve kimyasal kompozisyonu değiştirmek suretiyle tane sınır mühendisliği uygulamaları ve ikincil fazın çökmesi simule etmişlerdir. Elde edilen bulgular tane sınırları boyunca çökeltme ve bu çökeltelerin etrafında engelsiz martenzitik yapıların büyüdüğü göstermiştir. DSC analizleri sonucunda iki fazlı numunelerde çift yönlü martenzitik dönüşümleri olduğunu bulmuşlardır. Bu çökelteler aşırı plastik deformasyon yoluyla komşu östenitik tanelerde kısıtlamaların rahatlatılması, dönüşümdeki zorlanma ve çatlakları engellenmesini sağladığı sonucuna varmışlardır.

Akis (2012) şekil hafızalı Co-Ni-Al-Si alaşımını Vakum indüksiyon ocağı kullanarak döküm yoluyla elde etmiştir. Ardından alaşıma 1100 °C'de homojenleştirme (süre belirtilmemiş) ve sonrasında 100-600 °C arasında 1-5 saat süre aralıklarında yaşlandırma

ısıtılma işlemi uygulamışlardır. Elde ettiği alaşımın yaşlandırma işlemi sonucu dönüşüm sıcaklıklarının nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla DSC analizleri, örgü mesafesi ve düzenin belirlenmesi için X-ışını difraksiyonu, sertlik değişimlerinin belirlenmesi için Vickers sertlik ölçümleri, mikro yapı görünümleri için optik ve korozyon direncinin belirlenmesi için korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Elde ettiği bulgular aşağıda özetlenmiştir. Tüm numunelerde baskın fazın L10 martenzitik fazı olduğu dolayısıyla B2→L10 martenzitik faz dönüşümünün gerçekleştiğini belirtmiştir. Yapılan ısıtılma işlemlerinde martenzit fazının en yüksek  $a$  örgü sabiti değerlerine 300 °C'de 4 saat ve 400 °C'de 1 saat süre ile yaşlandırılan numunelerde ulaşıldığını bildirmiştir. Ms sıcaklığının oda sıcaklığı üzerinde olduğu tespit edilmesiyle beraber yaşlandırma etkilerine bağlı olarak Am-Mm değerlerinin 300 °C'de 2 saat süre ile yaşlandırılan numunede en yüksek olduğu ve bu numunenin morfolojik yapısının diğerlerinden farklı olarak dentritik yapıda olduğu ve Af - Ms sıcaklık farkının 100 °C'den çok daha küçük bir histerisiz aralığında olduğunu tespit etmiştir. Yaşlandırma ısıtılma işleminin korozyon dirençlerini arttırdığı ve başta tane sınırlarında olmak üzere çoğu numunede çökelti fazları meydana getirdiğini ve bu çökelti (yapı kusurlarının) sertlik artışı meydana getirdiğini belirtmiştir. Sertlikte meydana gelen artışları kararlılık derecesinin bir ölçüsü olarak değerlendirmiş ve bu durumu martenzitik fazın bir miktar stabilize olmasına atfetmiştir.

Yıldız ve ark. (2014) Co-Ni-Al-Sn Ferromanyetik Şekil Hafızalı Alaşımların üretimi ve Fiziksel özelliklerini incelemiştir. Co-Ni-Al-Sn alaşımını % ağırlık olarak sırasıyla 38, 33, 27 ve 2 miktarlarında vakumlu ve argon atmosferi altında arc-melter yöntemiyle üretmişlerdir. Homojenizasyon işlemi için üretilen alaşımı 1200 °C'de 24 saat süre ile tavlama ardından buzlu tuzlu suda soğutmuşlardır. Ardından alaşımın oda sıcaklığında martenzitik yapıda olması için 1350°C'de 4 saat süre ile yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur.

Üretilen alaşımın DSC analiz sonuçları Ms dönüşüm sıcaklığının 98,7 °C, ve TGA analiz sonuçları ise manyetik faz dönüşüm sıcaklığının (Curie sıcaklığı) 124,69 °C olduğu tespit edilmiştir. XRD analizleri sonucunda  $\beta'$  fazı (404 HV<sub>0.1</sub>) ve fcc  $\gamma$  fazı (130 HV<sub>0.1</sub>) ile östenit  $\beta$  fazının tespit etmişlerdir.  $\beta'$  fazının 1350 °C'de gerçekleştirilen yaşlandırma ısıtılma işlemi sonucunda meydana geldiğini ve bu iki faz arasında mikro sertlik değerleri bakımından büyük bir fark olduğunu belirtmişlerdir.

Oda sıcaklığında gerçekleştirdikleri manyetik ölçümler sonucunda Co-Ni-Al-Sn alaşımının manyetik saturasyon değerinin Co-Ni-Al alaşımına yakın olduğu ve yumuşak manyetik malzeme özelliği gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu durumu Ni ve Sn elementlerinin manyetik moment değerlerinin Co ve Al'ye göre düşük olmalarına bağlamışlardır.

Eskil ve ark. (2014) Şekil hafızalı Co-Ni-Al alaşımlarının literatürdeki farklı mekanik yükler ve termal etkiler altındaki davranışlarını kıyaslamak amacıyla Co-Ni-Al-Si alaşımını döküm yoluyla üretilen kristalografik özelliklerinin incelemiştir. Elde ettikleri bulgular ve literatür derlemesi sonucunda aşağıdaki yargılara varmışlardır. Co-Ni-Al alaşımlarının kimyasal kompozisyonlarının, özellikle Ni oranının, martenzitik dönüşüm sıcaklıkları üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Co faz diyagramları ışığında hcp ve fcc olmak üzere iki yapıda ortaya çıkabilir. Ancak bu fazların kararlılığının distorsiyon derecesi, kristal büyüklüğü kadar tavlama sıcaklığına göre de değiştiğini belirtmişlerdir. Birçok şekil hafızalı alaşımdan farklı olarak Co-Ni-Al alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda  $\beta + \gamma$  faz yapısına sahip olduklarını, ana faz olan  $\beta$  fazının görünebilmesi için düşük sıcaklıklarda tavlama yapılması veya alaşımın yüksek sıcaklıktan buzlu suya atılması ile görülebildiğini belirtmişlerdir.  $\gamma$  fazının  $\beta$ 'nin aksine daha yumuşak bir faz olduğundan alaşımın sünekliliğini artırdığı ve martenzit tabakalarının ilerlemesini engellediğini belirtmişlerdir. Ürettikleri Co-Ni-Al-Si alaşımı martenzitik örgü parametrelerini  $aL10= 3,8314 \text{ \AA}$ ,  $cL10= 3,1742 \text{ \AA}$  ve  $cL10/ aL10 = 0,8315$  olarak, yüksek sıcaklık fazının örgü parametresini ise  $a\gamma = 3,5587 \text{ \AA}$  ve östenit fazına ait örgü parametresinde;  $aB2= 2,8135 \text{ \AA}$  olarak tespit etmişlerdir.

## 2.2. Tel Erozyon Yöntemindeki Çalışmalar

Tel erozyon yöntemi geleneksel kesme yöntemlerine göre birçok avantajı bünyesinde barındırması dolayısıyla endüstriyel uygulamalarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yüksek yoğunlukla elektrik akımı ile yüklenen bir tel vasıtasıyla iletken malzemelerin hassas ölçülerde kesilmesi olayına tel erozyon kesme işlemi denir. Kesme işlemi farklı elektriksel kutuplarla iliştilen elektrotun kesilecek parçaya yaklaştırılmasıyla meydana gelen elektriksel boşalmanın oluşturduğu ısının metaldeki kısmi ergime meydana getirmesi sonucu parçacıkların kaldırılması prensibine dayanır. Parçacıkların kaldırılması her bir kıvılcımdaki enerji miktarı ve her geçen kıvılcımın geçen süresine bağlıdır.

Tel Erozyon yöntemi iş parçası boyunca lineer hareket eden bir tel elektrot vasıtasıyla elektrot ile parça arasında meydana getirilen elektriksel boşalimler sayesinde bilgisayar kontrollü kesme işlemidir. Bu yöntem ile özellikler karışık geometriye sahip sert malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Tel erozyon yönteminde üretilen parçaların ölçü doğruluğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etki eden birden çok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler: Akım şiddeti, gerilim, puls süresi, puls frekansı, tel gerilmesi, dielektrik sıvının püskürtülme basıncı, kesme aralığı voltajı, tel türü, tel çap ve kalınlığıdır.

Scott ve ark. (1991), tel elektro erozyonla işleme prosesinde etkili olan kesme parametrelerinin, işleme hızı ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda tel ilerleme hızı, deşarj akımı ve puls süresinin artışının yüzey pürüzlülük değerlerinin artışına neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Banerjee ve ark. (1993), tel erozyon tel elektrot üzerindeki termal yükleri hesaplamak için bir model önermişlerdir. Bu modelde puls süresi, tel ilerleme hızı ve tel elektrot çapının deşarj kanalındaki sıcaklık dağılımına ve bunun sonucu olarak yola çıkarak tel elektrotun kopma davranışını yorumlamışlardır. Yapılan çalışmalarda puls süresinin daha etken bir parametre olmakla beraber tel ilerleme hızının da etkili olduğunu bildirmişlerdir.

Hasçalık ve Çaydaş (2003) AISI 4340 çeliğinin C000, C500 ve C800 kesme parametreleri ile tel erozyon tezgâhında kesmişlerdir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda C kesme parametresinin artışı ile işlem süresinde kısalma olsa da malzeme yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve yüzeyin altında çatlak oluşumlarının arttığını belirtmişlerdir. Yazarlar dinamik yükler altında çalışacak parçaların işlenmesi durumunda yüzeyde koruyucu tedbirlerin alınmasının gerektiğini belirtmişlerdir.

Tosun ve ark. (2003), Polykristalin elmas kaplı WC kesici takımların Tel erozyonu yöntemiyle deiyonize su ortamında ve hava sisi ortamındaki işlenebilirliğinin tel hızı, dielektrik akışkan basıncı, açık devre voltajı, puls süreleri parametrelerine bağlı olarak iş parçası yüzeyinde meydana getirdikleri yüzey pürüzlülük değerlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda hava sisi koşullarının daha iyi yüzey pürüzlülük ancak bazı şartlarda daha kötü ölçü tamlığı değerleri sağladığını belirtmişlerdir.

Aspinwal ve ark. (2008), Havacılık endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan Ti-6Al-4V ve Inconel 718 alaşımlarından oluşan iş parçalarının bütünlüğüne asgari zarar vermek amacıyla yüksek özellikli puls jeneratörlerine sahip makineler kullanılarak çoklu kesme uygulamışlardır. Çalışma sonucunda ortalama yeniden kristalleşen bölge kalınlığının 11 µm' den düşük olduğu, olduğu hatta bazı pasalarda hiçbir hasarın meydana gelmediği, sertlik değerlerinde ve mikro yapıdaki değişikliklerin belirgin olmadıklarını belirtmişlerdir. Sonuçlar Tel erozyon kesme parametrelerinde ultra yüksek frekans ve kısa süreli puls kullanılarak numunelerdeki hasarlar asgari düzeye indirgenebileceğini göstermiştir.

Ay ve Aydoğdu (2010) Tel erozyon kesme parametrelerinin M303 extra plastik kalıp çeliğinin parça boyut ölçümlerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında proses parametreleri olarak puls süresi, tabla ilerleme hızı ve puls ara süresi değişik koşullarda denemişler ve Taguchi metodu ile bu parametrelerin en optimumu belirlenmeye çalışmışlardır. Ana güç kaynağı voltajı, ana güç kaynağı maksimum akımı, yardımcı güç kaynağı devresi, servo referans voltajı, tel gerginliği, tel ilerleme hızı, dielektrik sıvı dolaşım basıncı parametreleri ise deney süresince sabit tutmuşlardır. Boyut ölçümlerinin sağlıklı yapılabilmesi için üç boyutlu koordinat ölçme cihazı kullanmışlardır. Taguchi metoduna ilaveten deney parametrenin elde edilen sonuçlara etkisinin daha detaylı tayini için ise varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Tahminsel değerler regresyon modeli ile belirlenmiştir. Deney parametreleri arasında puls süresinin boyut tamlığı için en etken parametre olduğu, bunun yanında puls ara süresi ve SF parametrelerinin de az da olsa etkin olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar ayrıca deney tasarımı yöntemlerinin deney sayısının azaltılarak başarılı sonuçlara ulaşılmasına katkıda bulunduğu ve korelasyon katsayısının %99,2 olduğunu belirtmişlerdir.

Yurtkuran (2011) toz metalürjisi yöntemi ile üretilen alüminyum matrisli malzemelerin farklı alaşım elementleri (Cu, Mg) ve takviye elemanları (SiC parçacıkları) içeriklerine bağlı olarak tel elektro erozyon yöntemi ile işlenebilirliklerini incelemiştir. Değişken işlem parametreleri olarak puls ara süre ve tel elektro ilerleme hızı seçilmiş diğer parametreler sabit tutulmuştur.

Tel elektro erozyon yöntemi ile kesilen malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin diğer klasik imalat yöntemlerine göre oldukça düşük olduğu ve yüzey pürüzlülük değerlerinin kimyasal kompozisyona bağlı olarak değişiklik gösterdiğini belirtmiştir. Kesme işlemi sonucunda



yüzeylerde sert tabakanın oluştuğu ve mikro yapıda belirli oranlarda çatlakların oluştuğunu belirtmiştir. Çatlak oluşumunu çok yüksek ısıl gerilmelerin malzemenin çekme mukavemetini aşmasına bağlamıştır. Ayrıca alaşım elementlerinin pürüzlülük değerlerini olumsuz yönde etkilerken SİC takviyesi etkisinin olumlu yönde etkilediğini belirtmiştir.

Tel erozyon yöntemiyle ilgili yapılan literatür incelemelerinde çalışılan malzeme gurubunun daha çok kalıp çelikleri olduğu dikkat çekmektedir. Şekil hafızalı malzemeler üzerindeki sınırlı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Abhinaba ve Roy (2018), TiNiCu alaşımlarının tel erozyon kesme parametrelerinin kerf genişliği, yeniden katılan tabakanın kalınlığı ve kesilmiş yüzeylerin mikro sertlik değerlerini incelediklerine etkisini incelemiştir. Servo voltaj artışı ile kerf genişliğinin azaldığı düşük kerf genişliği eldesi için Optimum değer 60 volt olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada puls ara süresinin artışı ile yeniden katılan tabaka kalınlığının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca daha yüksek enerji deşarj işlemleri sebebiyle yüzeyde oluşan oksitlerin varlığından dolayı kesilmiş yüzeylerin sertlik değerlerinde artış meydana geldiğini ve kesilmiş numunelerin yüzey sertliklerinin faz dönüşümleri sonucu oluşan nikelce zengin fazlar  $\gamma$ -CuTi çökelti fazları dolayısıyla işlemsiz numunelere göre oldukça yüksek (560 HV) olduğunu belirtmişlerdir. Sertlik değerleri üzerinde en etken parametrenin puls ara süresi olduğu az da olsa servo voltaj süresinin etken olduğunu ancak diğer parametrelerin etkisinin ihmal edilir düzeyde olduğu bildirilmiştir.

Soni, Narendranath ve Ramesh, (2018), TiNiCo şekil hafızalı alaşımların tel erozyon kesme parametreleri üzerine yaptıkları çalışmalarında bu alaşımların geleneksel yöntemlerle işlenmesi durumundan sahip olduğu özelliklerinde kayıplar meydana gelebileceğine ilaveten düşük yüzey kalitesinin elde edilebileceği ve bu alaşımlarda tel erozyon ya da su jeti ile şekillendirmenin daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında  $Ti_{50}Ni_{45}Co_5$  alaşımının tel erozyon parametrelerine bağlı olarak mikro yapı, yüzey topografyası, mikro sertlik, XRD analizleri ve kalıntı gerilmelerine etkisini incelemiş ve Taguchi metodunu kullanmışlardır. Optimum yüzey pürüzlülüğü için proses parametrelerinin puls süresi 125  $\mu$ s, Puls ara süresinin 35  $\mu$ s ve servo voltajının 40 V olduğunu saptamışlardır. Daha yüksek sertlik değerlerinin yeniden katılan bölgenin altında oluştuğunu ve bu bölgede  $TiNiO_3$  ve  $TiO_2$  oksit oluşumlarının varlığını, belirtmişlerdir. Ayrıca, kesilmiş yüzeylerde kalıntı gerilmelerinin olduğunu belirtmişlerdir.

İleri mühendislik malzemelerinin Tel erozyon yöntemiyle kesilmesi ve kesilme parametrelerinin etkilerinin araştırılması literatürden görüldüğü üzere yeni bir olgudur. Malzemenin özelliklerinin korunması kadar korozyon ve aşınma doğrudan malzemenin yüzey özellikleriyle ilgili olduğundan bu malzemelerin Optimum kesme parametrelerle işlenmesi servis koşullarındaki kullanım ömürlerinin artırılmasına da katkıda bulunacaktır. Bundan dolayı bu çalışmada Co-Ni-Al alaşımlarının Tel erozyon yöntemindeki Optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Co-Ni-Al Şekil Hafızalı Alaşımın Üretimi

CoNiAl alaşımının döküm işlemi TÜBİTAK MAM'da gerçekleştirilmiştir. Alaşımın üretiminde ergitme işlemlerinde vakum indüksiyon ocağı (Balzers VSG02) ve zirkonya esaslı pota (ZR93TC) kullanılmıştır. Döküm işlemi esnasında Co ve Ni elementlerini pota içerisinde yerleştirilirken katkı bölmesine ise Al, Si ve Cu alaşımları yerleştirilmiştir. Vakumlama işleminin ardından 200 Torr Ar atmosferinde Co ve Ni'in ergitme işlemi yapıldı. Ardından pota içerisindeki Al, Si ve Cu ilave edilerek döküm sıcaklığına (1650-1750 °C) geldiğinde ise kapak açılarak önceden 1500-1600 C° ısıtılmış seramik kalıba döküm işlemi gerçekleştirildi. Üretilen numunelerin kimyasal analizleri Thermo Scientific - iCAP™ 7400 - ICP-OES Analiz Cihazı ile yapılmıştır.

##### 3.1.2. Faz Analizleri

Alaşımın kristalografik faz analizleri X-ışını difraksiyon (XRD) ölçümleri bilgisayar kontrollü bir Rigaku-Smart Lab. Cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan X-ışını difraktometresinde CuK $\alpha$  radyasyonu 1.54056 Å dalga boyu, 30 mA ve 40kV, 5°/dak 5-90° de arası taranmıştır.

##### 3.1.3. Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Ölçümleri

Alaşımlardaki dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesinde perkin METTLER TOLEDO DSC cihazı kullanılmıştır. Curie sıcaklığı ise TGA (Thermal Gravimetric Analysis) ölçümleri alınarak tespit edilmiştir.

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Tel Erozyon Yöntemi

Bu çalışmada; kesme işlemleri SPM Marka EZ20S model Tel Erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait görseller Resim 3.1’de ve özellikleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1. SPM EZ20S Tel erozyon tezgâhı (Birlik Makine Kalıp/Gaziantep)

Çizelge 3.1. SPM EZ20S Tezgâhın Özellikleri (Kullanım kılavuzundan alıntıdır)

Özellik	EZ20S	Birim
Maksimum parça boyutlar	900 × 550 × 250 (W×D×H)	mm
İş parçası boyutları	700 × 450 × 240	mm
Maksimum Parça kütlesi	600	kg
Tabla boyutları	784 × 466	mm
Tabla yüksekliği	950 (Zeminden itibaren)	mm
XYZ hareketi	500 × 300 × 260	mm

Çizelge 3.1. (Devam) SPM EZ20S Tezgâhın Özellikleri (Kullanım kılavuzundan alıntıdır

UV hareketi	100*100	mm
Mak. Açılı Kesim	$\pm 24/t = 100\text{mm}$	derece/kal.
Mak. Tabla hızı	1300	mm/dk.
Tel çapı	0.15 — 0.33 (std. 0,25 diğerleri ops.)	$\mu\text{m}$
Tel İlerleme hızı	0 — 15	m/dk.
Tel gerginliği	0.5 — 28	N
Tezgâhın dış boyutları	1600 × 1950 × 2000	mm
Tezgâhın toplam kütlesi	3000	kg

Tel erozyon kesme işlemi sırasında dielektrik sıvı sirkülasyon basıncı  $6 \text{ kg/cm}^2$ , 0.25 mm çapında CuZn37 pirinç tel kullanılmıştır. Kullanılan telin çekme mukavemeti  $1000 \text{ mm}^2$  dir. Tel elektrotun kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2'de ve görselleri Resim 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Pirinç Tel Kimyasal Kompozisyonu

Alaşım		Cu (%)	Zn (%)	Al (%)	Fe (%)	Ni (%)	Pb (%)	Sn (%)
CuZn37	min.	62	Rest	-	-	-	-	-
	max.	64		0,05	0,1	0,3	0,1	0,1

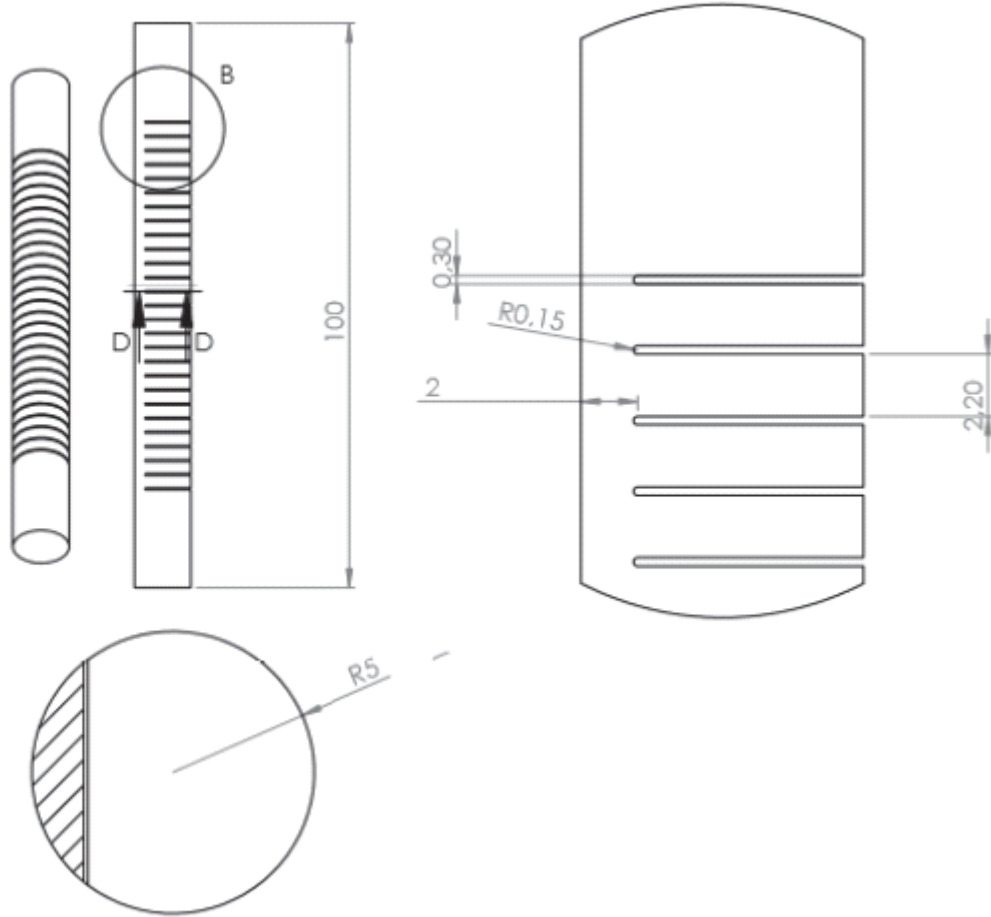


Resim 3.2. Çalışmada kullanılan pirinç tel elektrotlar.

Kesme işleminde kullanılan kobalt bazlı şekil hafızalı malzeme 10 mm çapında ve 100 mm boyunda silindirik parçadır. Çizelge 3.3'de verilen değişik kesme parametrelerini içeren toplamda 27 adet değişik kesme işlemi gerçekleştirildi. Kesme işleminin teknik resim görünümü Şekil 3.1'de verilmiştir. Ayrıca kesme sonucu malzeme görünümü Resim 3.3'deki gibi olmuştur.

Çizelge 3.3. Tel Erozyon Kesme Parametreleri

Voltaj (V)	Akım (A)	Puls Süresi( $\mu$ s)
54	6	1
44	9	2
34	12	3



Şekil 3.1. Tel erozyon yöntemi ile kesilen numunelerin teknik resmi.



Resim 3.3. Tel erozyon yöntemi ile kesilen numune görünüşleri.

### 3.2.2. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Yüzey pürüzlülük değerlerinin belirlenmesinde Ra ve Rz pürüzlülük parametreleri en fazla kullanılan parametrelerdir. Ra numune yüzeyinden alınan bütün profilden alınan ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalamasını ifade ederken Rz ise yüzeydeki en yüksek tepe ile en derin çukur arasındaki yükseklik farkıdır. Kesme işlemi sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülükleri belirlenmesi amacıyla Mitutoyo Surftest 211 2D profilmetre kullanılmıştır. Numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin belirlenmesi için numunenin üzerindeki ilk kesme kısmı, orta kısmı ve kesme sonu kısmından olmak üzere 3 bölgeden 2 mm/s hızda ve 6 mm uzunlukta ölçülmüş ve aritmetik değerlerin ortalaması alınmıştır.

### 3.2.3. Genetik programlama (GEP)

Genetik programlama (GEP), John Koza tarafından 1992 yılında çeşitli görevleri yerine getiren program olarak geliştirildi (Koza, 1992). Bu program genetik algoritmaların bir uzantısı olarak ifade edilebilir. Yönettikleri yapının gösterimi ve bu gösterimin taşıdığı temel anlam aralarındaki fark olarak ortaya çıkar. Genetik programlar genellikle bilgisayar programlarına barındıran ağaç popülasyonları üzerine çalışır. Bu yüzden de genetik algoritmalara göre daha soyut kalmaktadırlar (Wong ve Leung, 1999). Mutasyon ve çaprazlama operatörleri ağaç yapısına uygun olarak yapılandırılmıştır. Çıktılar bilgisayar programları olup matematiksel model değildirler. Bu bilgisayar programları rastlantısal olarak üretilirler. Üretilen programlar hiyerarşik, genel, değişik, genel değişik boyutlarda ve yapıdadır. Yöntemin amacı bütün çözüm uzayını tarayarak problemin çözümüne en yakın bilgisayar programını kurmak üzerine kuruludur.

### 3.2.4. Metalografik incelemeler

Numunelerin boyutları küçük olduğundan parlatma işlemlerinin kolaylıkla gerçekleştirilmesi için numuneler öncelikli olarak Struers citopress-30 marka bakalite alma cihazında sıcak bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler pürüzsüz bir yüzey elde etmek amacıyla 180 meshlik zımparadan başlanarak kademeli bir düşüş ile 1500 meshlik SiC zımparaya kadar Struers Tegrami-25 marka zımpara tezgâhı zımparalanmış ardından aynı tezgâh ile 1 µm'lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatma işlemi sonrası numuneler 75 ml HCl + 25 ml HNO<sub>3</sub> karışımı dağlayıcı ile 6 sn. süresince dağlanmış ve optik görüntüler elde edilmiştir. Dağlanan numunelerin optik görüntüleri Nikon MA 200 ve taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS) görüntüleri TESCAN MAIA3 XMU cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.5. Mikro sertlik incelemeleri

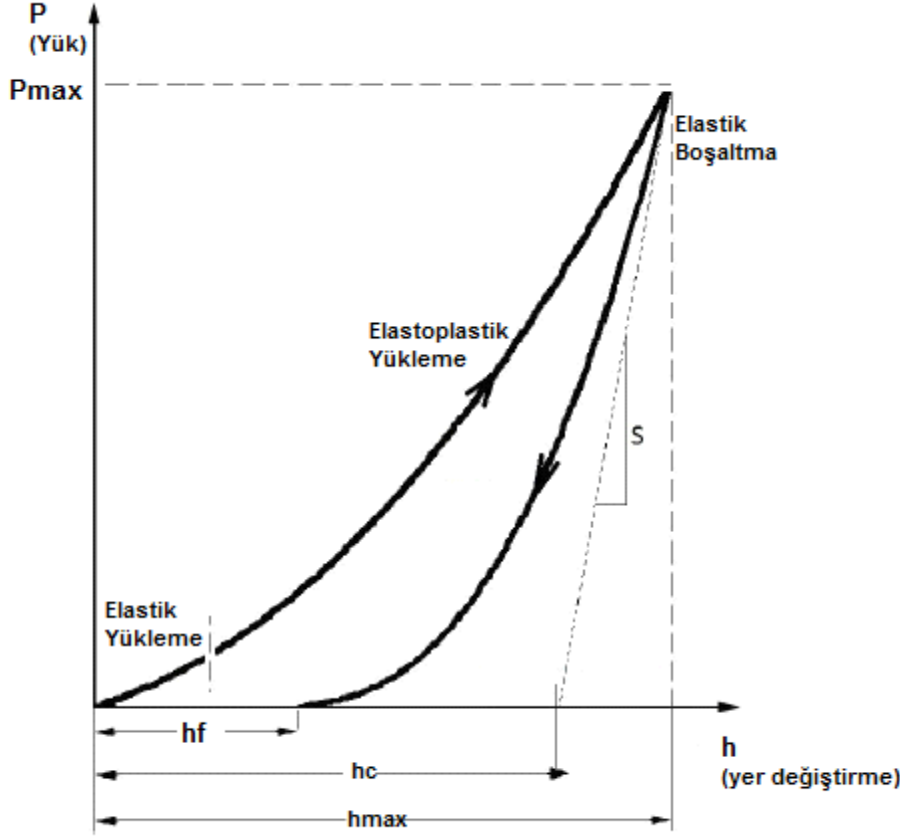
Tel erozyonu kesme işleminde malzeme ısıdan ve malzeme yüzeyinde malzeme ergir ve soğutma suyu ile yeniden katılaştır. Bu durum malzemenin yüzey kısmında sertlik değişimlerine neden olabilir. Isıdan etkilenen bölgenin derinliği ve ana malzemeye göre sertlik farklılıklarını belirlemek amacıyla, kesme yüzeyine dik yeni bir yüzey elde edilerek ilgili kesitten sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri 50 grf ve 10 sn bekleme süresi ile QNESS Q10 (Austria) mikro sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.6. Nano İndentasyon İncelemeleri

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde genellikle kalıcı deformasyonları içeren tahribatlı muayeneler kullanılmaktadır. Araştırmacılar mekanik özelliklerinin belirlenmesi talep edilen malzemelerin hurdaya ayrılmaması ve tekrar kullanılmasına engel olmayacak şekilde deforme edilmemesinin veya ihmal edilebilecek kadar deforme edilmesinin ve ince film kaplamaları gibi mikron değerinden daha düşük kalınlıklara sahip kaplamaların mekanik özelliklerinin belirlenmesinin yolunu aramaktadırlar. Bulunan yöntemlerden bir tanesi de nano indentasyon yöntemidir. Nano indentasyon; kalıcı hasarlar vermeden 20 nm gibi küçük penetrasyon derinliklerinde dahi malzemelerin sertlik, elastisite modülü ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerini bulmaya yarayan bir metottur (Pethica ve diğ, 1983; Bayrak, 2012).



Derinlik hassasiyetine göre ölçüm yapılan bu yöntemde Şekil 3.2’de görüldüğü gibi yük-batma derinliği eğrileri elde edilmekte ve belirtilen mekanik özelliklerin hesabı bu eğrilere göre belirlenmektedir (David ve Bahr, 2008; Gül, 2010).



Şekil 3.2. Yük batma derinliği eğrisi (Bayrak, 2012).

Burada;

hf: Yük kaldırıldıktan sonra malzeme yüzeyinde kalan nihai batma derinliğidir.

hc: Kullanılan ucun yüzeye son temas eden noktasından noktasal temas ettiği uç kısmına olan mesafedir.

hmax: Yükün maksimum olduğu noktada malzemede meydana gelen batma derinliğidir.

Boşaltma esnasında çizilen eğrinin ilk kısmı lineer bir davranış göstermektedir. Bunun temel sebebi olarak, batıcı uçun geri çekilirken elastik davranış göstermesidir. Ancak bu doğrusallık sürekli olarak devam etmez. Lineerliğin bozulduğu bu noktadan itibaren ise plastik deformasyon başlar (Fisher, 2005; Nemecek ve diğ, 2012).

Nano indentasyon yöntemi ile bulunabilecek mekanik özellikler;

Sertlik Değeri (H) : İndentasyon yönteminde sertlik değeri maksimum yükün oluşan izin yüzey alanına bölünmesi ile bulunur. Değerler GPa olarak ölçülür.

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (3.1)$$

İndirgenmiş Elastisite Modülü ( $E_r$ ) :İndentasyon deneyinde iki farklı malzeme birbiri ile temas halinde olduğu için bu duruma özgü indirgenmiş elastisite modülü ( $E_r$ ) tanımlıdır. Test edilen numune ve batıcı uç malzemesinin elastik sabitleri ile bulunabilir. (Denklem 2). Ayrıca denklem 3 kullanılarak da tespit etmek mümkündür.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1}{E_m} + \frac{1}{E_i} \quad (3.2)$$

Burada  $E' = E/(1-\nu^2)$  : poisson oranı

$$E_r = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{S}{\sqrt{A(h_c)}} \quad (3.3)$$

Burada  $\beta$  geometrik sabittir. Berkovich uç için bu değer çalışmalarda farklı değerler almıştır. Genellikle değerler 1 ile 1,05 arasındaki değerlerdir (Nemejek sayfa 56).

$A(h_c)$ :  $h_c$  derinliğindeki kalıcı izin izdüşüm alanı

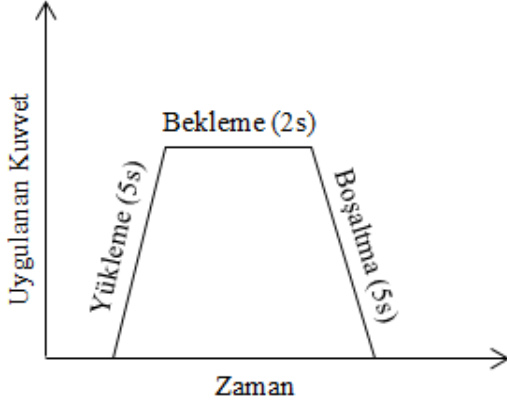
$S$ : Lineer bölgede tespit edilebilen kontak direngenliğidir.

$$S = \frac{dp}{dh} \quad (3.4)$$

Tel erozyon yönteminde meydana gelen yeniden katılan bölge 3-9  $\mu\text{m}$  aralığında olduğundan mikro sertlik testi ile bu bölgenin sertlik değerleri tespit edilmemiştir. Bu ince bölgenin sertlik değerlerinin tel erozyon işleminden nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla Hysitron Triboindenter TI 950 marka nano indentasyon cihazı kullanılmıştır.

Elmas Berkovich uç nano sertlik testlerinde çentici ucu olarak kullanılmıştır. Testler Oliver-Pharr analiz yöntemine uygun olarak 1x2 analiz matrisi ile 5  $\mu\text{N}$ 'luk maksimum kuvvet altında, 5 s boyunca yükün lineer olarak arttığı 2 s boyunca yükün sabit kaldığı ve 5 s'de yükün kademeli olarak kaldırıldığı trapezoidal bir yük fonksiyonu kullanılarak kuvvet kontrollü olarak gerçekleştirildi (Şekil 3.3). İndentasyon testi sonrası numunelerin yüzey

görüntüleri taramalı uç mikroskopu ile (Scanning Probe Microscopy; SPM) alınarak yüzey analizleri gerçekleştirildi.



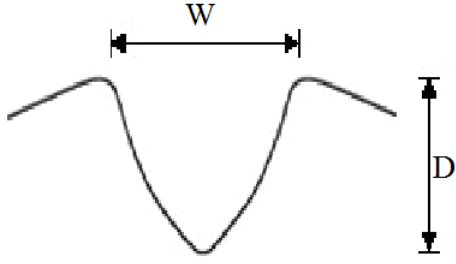
Şekil 3.3. Nanosertlik ölçümlerinde kullanılan yük fonksiyonu.

Elde edilen analiz sonuçlarından bir yük vs. yer değiştirme eğrisi oluşturuldu ve eğriden yararlanılarak numunenin sertliği ve elastik modülü hesaplandı.

### 3.2.7. Aşınma Testleri

Aşınma testleri, Nanovea T50 marka karşıt hareketli aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. 2 adet hassas kesme cihazı ile sulu bir ortamda kesilen ve tel erozyon yöntemi ile kesilmeleri sonucu yüzeyinde en yüksek pürüzlülük ve en düşük pürüzlülük değerlerinin elde edildiği numunelerin kuru ortamdaki aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma testleri 5 N yük ve 125 m kayma mesafesi boyunca 10 mm/s kayma hızı ve 5 mm karşıt hareket genişliği, 6 mm çapında VC (1937 HV) bilya ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Aşınma izleri genişlik ve derinlikleri 3'er adet oluşturulup ortalamaları alınarak, Veeco Dektak 6M marka bir yüzey profilometresi ile ölçüldü. Aşınma izinin kesiti bir elipsin yarısı olarak kabul edildi ve aşınma izinin alanı hesaplandı (Şekil 3.4). Literatürdeki aşınma ile ilgili çalışmalarda kullanılan aşağıdaki hesaplama metodu kullanıldı. (Gunen ve ark., 2014; Kurt ve ark., 2018). Daha sonra bu alan, kayma genişliği olan 5 mm ile çarpıldı ve aşınma iz hacmi ( $\text{mm}^3$ ) hesaplandı.



Şekil 3.4. Aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi.

$$V = \frac{\pi}{4} K * W * D \quad (3.5)$$

V: Aşınma iz hacmi

K: Karşıt hareket genliği (5 mm)

W: Aşınma izinin genişliği

D: Aşınma izinin derinliği olarak tanımlanmıştır.

Aşınma iz hacmi, uygulanan deney yükü ve toplam kayma mesafesine bölünerek mm<sup>3</sup>/Nm birimiyle aşınma hızı hesaplandı.

$$\text{Aşınma Hızı} = \frac{\text{Aşınma İz Hacmi}}{\text{Uygulanan Yük} * \text{Kayma Genliği}} \quad (3.6)$$

Aşınma iz hacmi, uygulanan deney yükü ve toplam kayma mesafesine bölünerek mm<sup>3</sup>/Nm birimiyle aşınma hızı hesaplandı.

Numunelerin 125 m aşındırılmaları sonucu oluşan değerler alınarak aşınma hızı hesaplandı. Sürtünme katsayılarının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi bilgisayar programı vasıtasıyla çizildi. Ayrıca aşındırılan numunelerin yüzeyleri SEM ile incelenerek aşınma tipleri yorumlanmıştır.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. CoNiAl Alaşımının Spektral Analiz Sonuçları

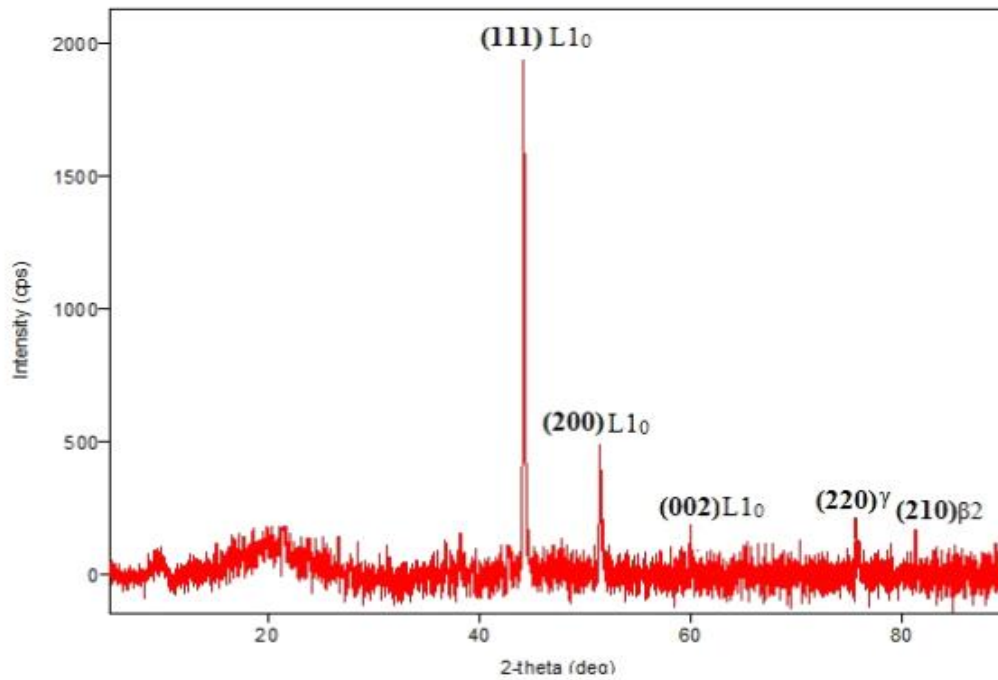
Vakum indüksiyon yöntemi ile döküm yoluyla üretilen CoNiAl alaşımının kimyasal kompozisyonu Spektrofotometrik olarak atomik emisyon (ICP) cihazı ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. CoNiAlCu süper alaşımının kimyasal kompozisyonu.

Alaşım elementleri	Co	Ni	Al	Cu	Si	P
ağ. %	43,77	40,15	6,66	4,96	3,17	1,29
At. %	38,97	35,88	12,95	4,10	5,92	2,19

### 4.2. XRD analizleri

Döküm işleminden sonra herhangi bir ısıl işlem uygulanmayan numunelerin XRD analizleri Rigaku Radb Dmax-III smart lab. Cihazı ve Cu-K $\alpha$  ışını kullanarak 2 $\theta$  açısı ve 5°/dak tarama açısı ile elde edilen XRD sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir.

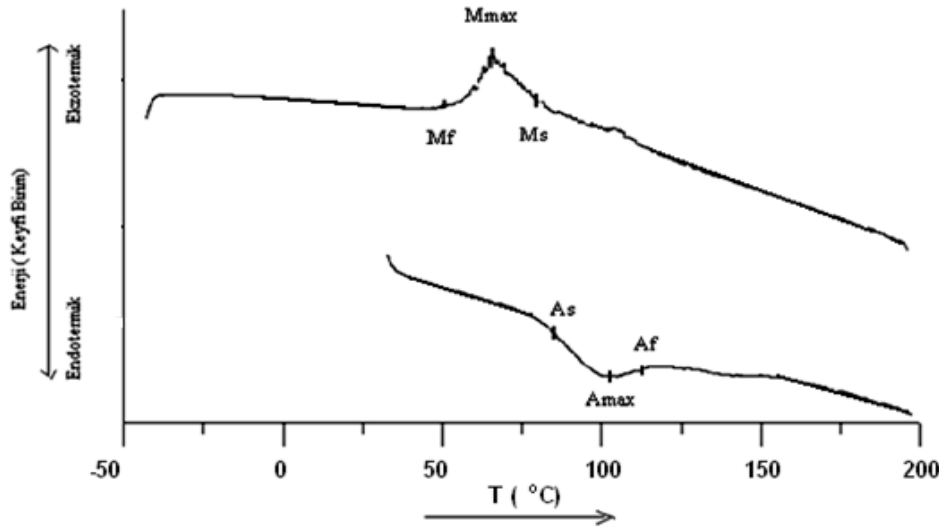


Şekil 4.1. CoNiAl alaşımının XRD analizi.

XRD analiz sonucu incelendiğinde pikleri incelendiğinde yapının bcc yapıya sahip  $\beta$  östenit fazı, fcc yapıya sahip yüksek sıcaklık fazı  $\gamma$  ve bct yapıya sahip L10 martenzitik  $\beta'$  3 faz bir yapı tespit edilmiştir. Elde edilen fazlar literatürde CoNiAl alaşımları üzerindeki çalışmalar ile uyumludur (Liu ve ark., 2006; Zhang ve Liu, 2008; Yıldız ve ark., 2014; Eskill ve ark. 2014). XRD analizinde görüldüğü üzere baskın fazın  $44,8^\circ$  da görülen (111) L10 martenzit fazıdır. Bu faza ait örgü parametrelerinin  $a_{L10} = 3,8314 \text{ \AA}$ ,  $c_{L10} = 3,1742 \text{ \AA}$  ve  $c_{L10}/a_{L10} = 0,8315$  olduğu tespit edilmiştir. Daha düşük şiddetlerde ise  $\gamma$  ve  $\beta$  tespit edilmiştir. Edilen  $\gamma$  (220) fazının kafes örgü parametresi ise  $a_\gamma = 3,5587 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 2,8124 \text{ \AA}$  olarak tespit edilmiştir.

### 4.3. CoNiAl Alaşımının DSC Analizleri

Şekil 4.2'de  $1100^\circ\text{C}$  de homojenize edilen numuneden elde edilen DSC eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.2.  $1100^\circ\text{C}$  de homojenize edilen numunenin  $5^\circ\text{C}/\text{dakika}$  ısıtma ve soğutma hızları sonucu elde edilen DSC eğrileri.

DSC eğrilerinin altındaki alanın genişliği DSC testleri sırasındaki ısıtma ya da soğutma işlemine bağlı olarak faz dönüşümünün ne oranda gerçekleştiği hakkında bilgi verir. DSC testlerinden elde edilen eğrideki genişliğine artışı ile meydana gelen faz dönüşümü o kadar fazladır (Eskill, Seval, Akis, 2014). Şekil 4.2'de gösterilen numunenin DSC eğrisinde  $A_{\max} - M_{\max}$  sıcaklık farkının  $35,41^\circ\text{C}$  olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde  $A_f$ ,  $A_s$  ve  $A_{\max}$  dönüşüm sıcaklıklarının  $22^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$  ve  $100^\circ\text{C}$  olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan  $M_f$ ,  $M_s$  ve  $M_{\max}$  sıcaklıkları ise  $55,04$ ,  $88^\circ\text{C}$  ve  $64,81^\circ\text{C}$  olarak tespit edilmiştir.

#### 4.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Tel erozyonla kesme yapıldığında bir parçayı ikiye ayırmaktadır. Bu sayede birbirine bakan iki yüzey aynı kesme parametresiyle meydana gelmiş olacaktır. Bu sayede tez çalışması içerisinde toplam 54 adet yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmıştır. Her bir yüzey üzerinden kesme başlangıç noktası, orta nokta ve kesme sonu çizgisinden ölçümler yapılarak her bir numune üzerinden üç değer ölçüldükten sonra bu değerlerin ortalamaları alınarak Çizelge 4.2 de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kesme parametrelerine göre ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri

Sıra No	Gerilim (V)	Akım (A)	Puls süresi ( $\mu$ s)	Yüzey Pürüzlülük ( $\mu$ m)	Sıra No	Gerilim (V)	Akım (A)	Puls süresi ( $\mu$ s)	Yüzey Pürüzlülük ( $\mu$ m)
1	54	6	1	2,96	28	54	6	1	2,59
2	54	6	2	2,61	29	54	6	2	2,61
3	54	6	3	2,75	30	54	6	3	2,58
4	54	9	1	2,86	31	54	9	1	2,59
5	54	9	2	2,63	32	54	9	2	2,49
6	54	9	3	2,50	33	54	9	3	2,37
7	54	12	1	2,19	34	54	12	1	2,17
8	54	12	2	2,61	35	54	12	2	2,47
9	54	12	3	2,33	36	54	12	3	2,43
10	44	6	1	2,66	37	44	6	1	2,71
11	44	6	2	2,63	38	44	6	2	2,70
12	44	6	3	2,79	39	44	6	3	2,74
13	44	9	1	2,71	40	44	9	1	2,61
14	44	9	2	2,69	41	44	9	2	2,73
15	44	9	3	2,64	42	44	9	3	2,65
16	44	12	1	2,40	43	44	12	1	2,17
17	44	12	2	2,31	44	44	12	2	2,39
18	44	12	3	2,13	45	44	12	3	1,99
19	34	6	1	3,23	46	34	6	1	2,63
20	34	6	2	2,78	47	34	6	2	2,84
21	34	6	3	3,22	48	34	6	3	3,15
22	34	9	1	3,01	49	34	9	1	3,04
23	34	9	2	2,91	50	34	9	2	2,64
24	34	9	3	2,49	51	34	9	3	3,03
25	34	12	1	2,53	52	34	12	1	2,40
26	34	12	2	2,29	53	34	12	2	2,35
27	34	12	3	2,12	54	34	12	3	2,07

En düşük yüzey pürüzlülüğü 18 numaralı numunede elde edilirken en yüksek yüzey pürüzlülüğü ise 21 numaralı numunede elde edilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, akım şiddetinin sabit olduğu durumda, vuruş süresinin artmasıyla yüzey kabalaşmaktadır. Vuruş süresi, tel elektrota uygulanan elektrik zamanının uzunluğudur. Bir başka değişle tel ile iş parçası arasında oluşan kıvılcım boşalımının zaman periyodudur. Dolayısıyla vuruş süresindeki artış, iş parçasının yüzeyine daha fazla ısı enerjisinin transfer edilmesine yol açmakta ve iş parçası yüzeyinde daha büyük kıraterlerin oluşmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde akımın artmasıyla da yüzeyin kötüleştiği görülmektedir. Akım şiddetinin artması, iş parçası yüzeyine daha yoğun bir enerji boşalımının olmasına yol açmakta ve bunun sonucu olarak yüzeyden daha fazla talaş kaldırılmaktadır. Yüzeyden kaldırılan talaş miktarının artması, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü de kötüleştirmektedir.

### 4.3 Genetik programlama (GEP)

Modelleme, ortalama  $R_a$  pürüzlülük değerlerini kesme parametrelerinden voltaj, Akım ve puls süresine bağlı olarak hesaplamak için düzenlenmiştir. Çizelge 4.3'te modelde kullanılan değişkenlerin kodları, kısaltmaları ve aralıkları verilmiştir. GEP model değişkenleri ise Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Çizelge 4.5'te ise fonksiyon set listesi görülmektedir. Bu çalışmada toplamda literatürle uyumlu olan 54 deney yapılmıştır. 54 deney sonucundan 42 âdeti modelleri oluşturmak için 12 adedi ise test verisi olarak kullanılmıştır. Test verileri rastgele seçilmiştir. Eğitim ve test verileri programa yüklenerek parametreler tek tek değiştirilmesi yoluyla Optimum parametre setini oluşturmak için GEP yazılımı çalıştırılmıştır. En uygun parametre seti olarak en yüksek  $R_2$  değerlerini veren set seçilmiştir (Kanca ve ark., 2017).

Çizelge 4.3. Modelde Kullanılan Değişkenler.

	Kod	Değişken	Birimi	Aralığı
Giriş Verisi 1	d0	Gerilim (V)	V	34-54
Giriş Verisi 2	d1	Akım (A)	A	6-12
Giriş Verisi 3	d2	Puls süresi n	( $\mu$ s)	1-3
Çıkış Verisi 1	F1	Yüzey P. ( $\mu$ m)	$R_a$	1,99-3,23



Çizelge 4.4. GEP model değişkenleri.

Değişken Kodu	Değişken Adı	Açılımı
P1	Fonksiyon seti	+, -, *, /, $e^x$ , ln, log, $1/X$ , $X^2$ , $X^3$ , $\sqrt{\quad}$ , $\sqrt[3]{\quad}$ , tan
P2	Gen sayısı	2,3,4,5
P3	Başlık Sayısı	5, 8, 10, 15
P4	Bağlantı fonksiyonu	Toplama (+), Çarpma (*)
P5	Deneme sayısı	10000 and 20000
P6	Kromozomlar	30-45
P7	Mutasyon Oranı	0.044
P8	Ters Çevirme Oranı	0.1
P9	Gen Yer değiştirme Oranı	0,1

Çizelge 4.5. Fonksiyon Set Listesi.

Kot	Fonksiyon Seti
S1	+, -, *, /, $e^x$ , ln, log, $X^2$ , $X^3$ , $\sqrt{\quad}$ , $\sqrt[3]{\quad}$ , tan
S2	+, -, *, /, $e^x$ , ln, log, $X^2$ , $X^3$ , $\sqrt{\quad}$ , $\sqrt[3]{\quad}$
S3	+, -, *, /, $e^x$ , ln, log,
S4	+, -, *, /, $\sqrt{\quad}$ , $1/X$
S5	+, -, *, /

Elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde aşağıdaki basamaklar takip edilmiştir. Çizelge 4.5'te deki formül setleri ve Çizelge 4.4'te görünen gen sayısı başlık sayısı ve bağlantı fonksiyonlarını sistematik olarak değiştirilerek çok sayıda modelleme yapıldı. Bu modellemelerin öğrenim ve test verilerine ait  $R^2$  değerleri Çizelge 4.6'te görülmektedir.  $R^2$  değerlerinin yüksek olması öğrenme modelinin sağlıklı olduğunu gösteren bir veridir. Dahası test verisinin de yüksek olması oluşan modelin öğrenmediği verileri de modelleme kabiliyetinin iyi olduğunu göstermektedir. Bu yüzden modellemelerden hem öğrenim hem de test verilerine ait  $R^2$  değerlerinin yüksek olan modelleme sonuç olarak kabul edilmiştir.

En iyi GEP formülasyonlarının elde edildiği parametreler ile eğitim ve test verileri için istatistiksel parametreler Çizelge 4.7'te verilmiştir. Tablo içerisinde yer alan  $R^2$ , MSE, MAE

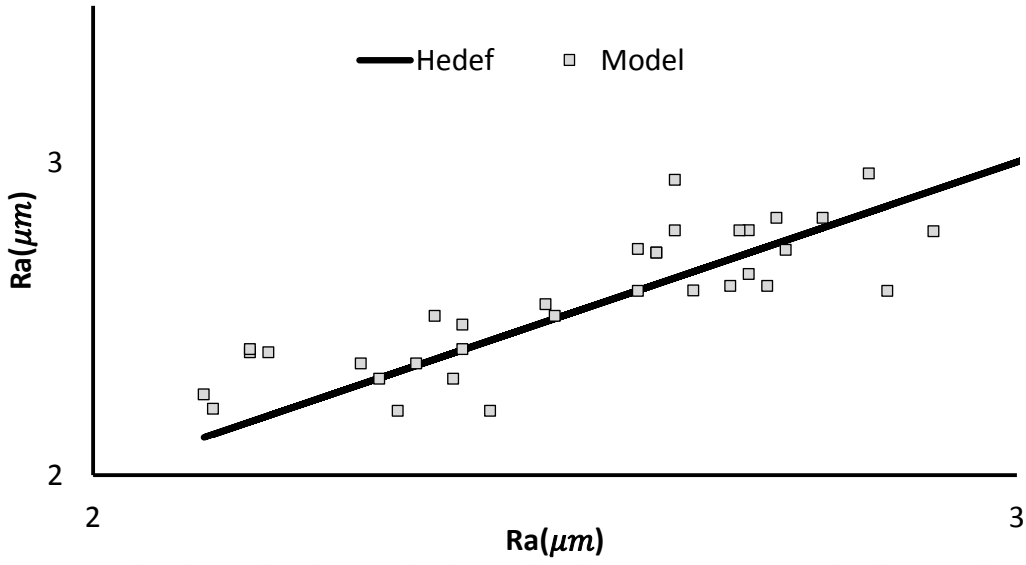
ifadeleri sırasıyla, korelasyon katsayısı, hataların ortalama kareleri ve ortalama mutlak hatayı temsil etmektedir. Sırası ile eğitim ve test verilerine ait korelasyon katsayıları 0,764 ve 0,689 olarak tespit edilmiştir. Modellerden elde edilen değerlerin dağılımının hedef değerlerle karşılaştırılması Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te görülebilmektedir. Grafikler incelendiğinde model değerlerinin çoğunlukla hedef değerler etrafında kümелendiği görülmektedir.

Çizelge 4.6. Denenen GEP Modellerinin İstatistiksel Sonuçları.

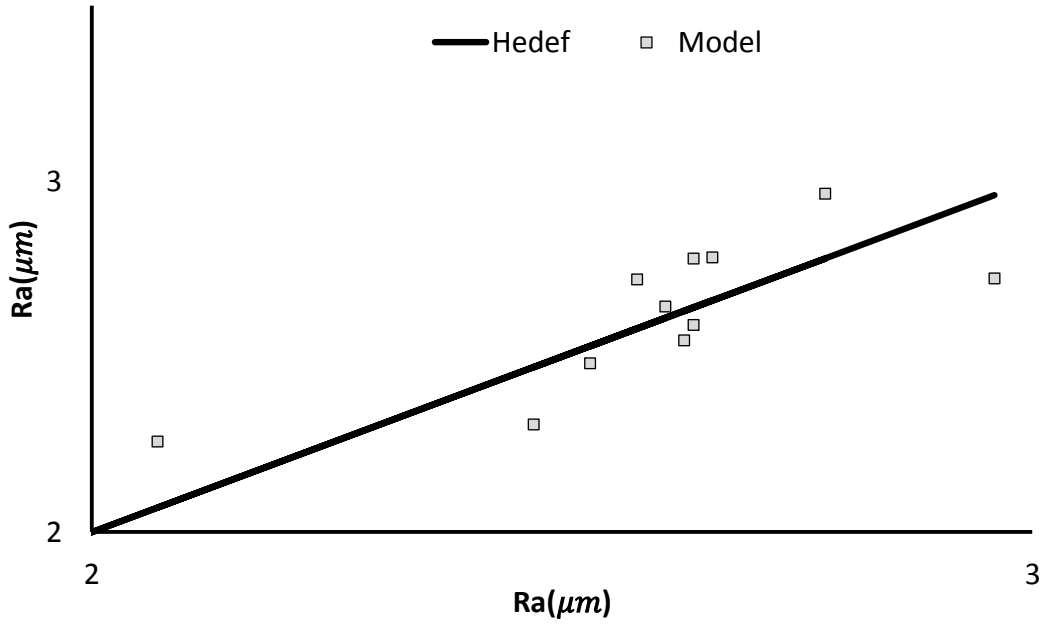
P1	P2	P3	P4	R <sup>2</sup>		P1	P2	P3	P4	R <sup>2</sup>	
				Öğr. Data	Test Data					Öğr. Data	Test Data
S1	2	5	+	0,598	0,469	S3	4	10	+	0,618	0,322
S1	2	5	*	0,615	0,266	S3	4	10	*	0,512	0,455
S1	3	8	+	0,706	0,383	S3	5	15	+	0,745	0,538
S1	3	8	*	0,659	0,486	S3	5	15	*	0,711	0,466
S1	4	10	+	0,736	0,495	S4	2	5	+	0,643	0,511
S1	4	10	*	0,746	0,526	S4	2	5	*	0,718	0,427
S1	5	15	+	0,731	0,441	S4	3	8	+	0,722	0,576
S1	5	15	*	0,753	0,557	S4	3	8	*	0,761	0,456
S2	2	5	+	0,645	0,505	S4	4	10	+	0,788	0,491
S2	2	5	*	0,674	0,462	S4	4	10	*	0,730	0,543
S2	3	8	+	0,631	0,446	S4	5	15	+	0,707	0,504
S2	3	8	*	0,573	0,339	S4	5	15	*	0,736	0,553
S2	4	10	+	0,679	0,439	S5	2	5	+	0,594	0,484
S2	4	10	*	0,678	0,534	S5	2	5	*	0,619	0,372
S2	5	15	+	0,705	0,479	S5	3	8	+	0,711	0,482
S2	5	15	*	0,674	0,392	S5	3	8	*	0,649	0,377
S3	2	5	+	0,722	0,514	S5	4	10	+	0,714	0,463
S3	2	5	*	0,482	0,568	S5	4	10	*	0,717	0,454
S3	3	8	+	0,721	0,640	S5	5	15	+	<b><u>0,764</u></b>	<b><u>0,689</u></b>
S3	3	8	*	0,629	0,583	S5	5	15	*	0,738	0,524

Çizelge 4.7. En iyi GEP Modelinin İstatistiksel Sonuçları.

İstatistiksel Veriler	Öğrenme Verisi	Test Verisi
MSE	0,021	0,022
MAE	0,120	0,134
R <sup>2</sup>	0,874	0,830



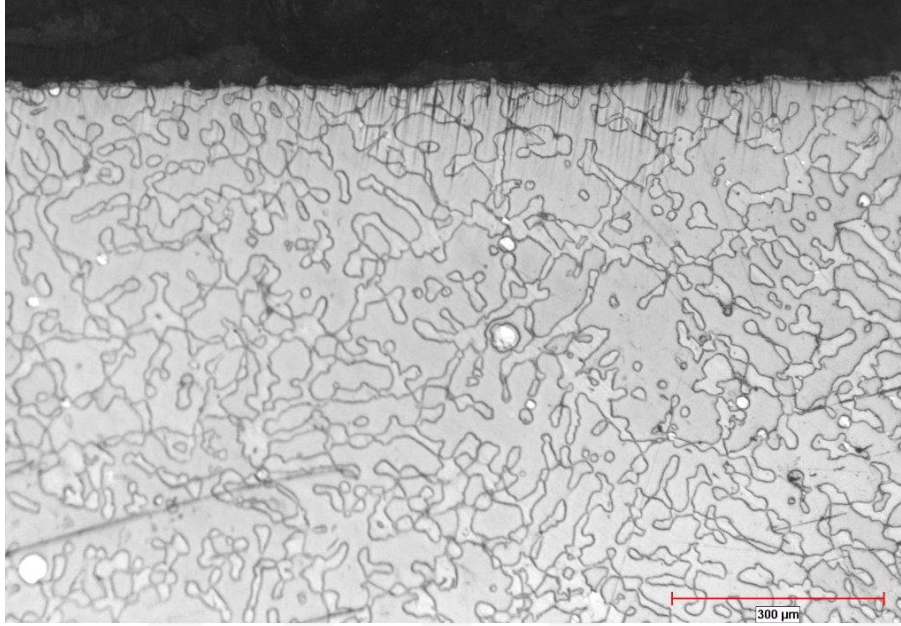
Şekil 4.3. Eğitim Verileri için GEP Modeli Sonuçlarının Deneysel Verilerle Karşılaştırılması.



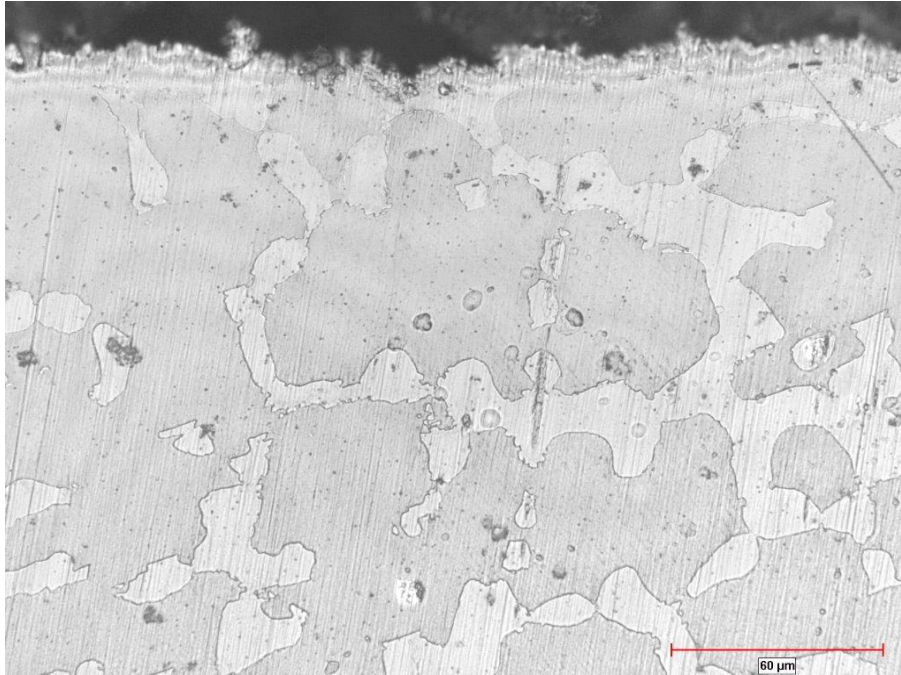
Şekil 4.4. Test Verileri için GEP Model Sonuçlarının Deneysel Verilerle Karşılaştırılması.

#### 4.4 Optik Mikro Yapı Analizi

Resim 4.1'de zımparalama ve parlatma aşamalarından sonra 75 ml  $\text{HNO}_3$  ile 25 ml  $\text{HCl}$  çözeltisi içerisinde 6 sn süresince kimyasal dağlama sonrası Nikon MA 200 optik mikroskop ile alınan 100X, 500X ve 1000X büyütmeler ile alınan görüntüler verilmiştir.

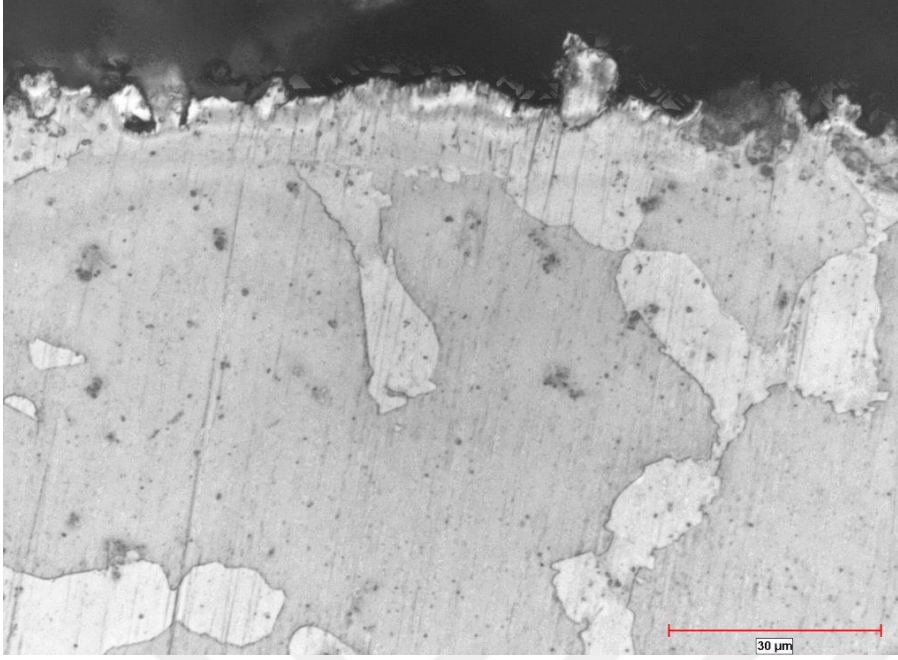


(a)



(b)

Resim 4.1. CoNiAl alaşımlının mikro yapı resmi a) 200X b) 500X c)1000X.



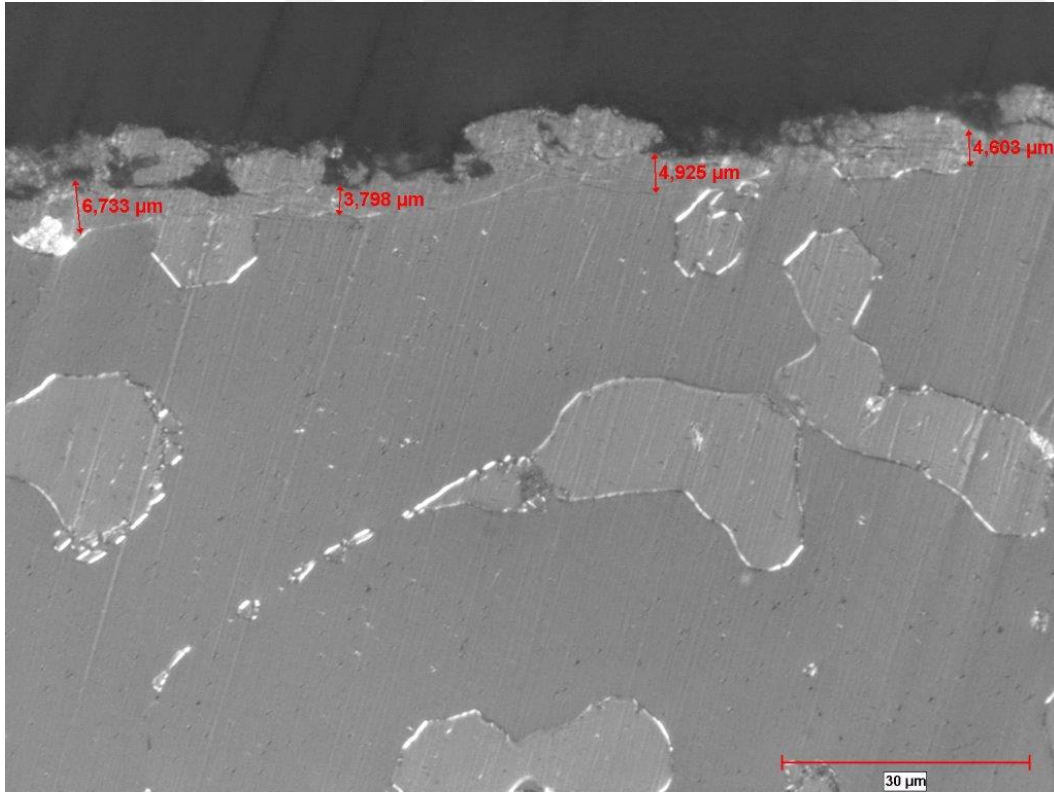
(c)

Resim 4.1. (Devam) CoNiAl alaşımının mikro yapı resmi a) 200X b) 500X c)1000X.

Resim 4.1'de görüldüğü üzere CoNiAl alaşımının tipik dentritik bir morfolojiye sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir (Resim 4.1). Mikro yapı içerisindeki bu morfolojiyi incelendiğinde bu yapının CoNiAl alaşımlarında gözlenen  $\beta$  ve  $\gamma$  fazları oldukları tespit edilmiştir (Liu ve ark., 2006). CoNiAl alaşımlarındaki bu yapının oluşumu literatürde ilk olarak  $\beta$  primer dentritik çekirdeklerin oluşması ardından ise oluşan bu çekirdeklerin etrafında  $\beta + \gamma$  interdentritik ötektik yapılar tarafından çevrelenmesi şeklinde oluştuğu rapor edilmiştir (Liu ve ark, 2006). Bu iki yapı içerisindeki  $\beta$  fazı kırılmandır  $\gamma$  fazı ise  $\beta$  fazının aksine malzemenin sünekliğini olumlu yönde etkiler (Eskil ve ark., 2014), Bu iki faz BCC(Body Centred Cubic)-BCT(Body-Centered Tetragonal) martenzit faz oluşum haricinde birçok benzer özelliğe sahiptir. CoNiAl alaşımlarında martenzitik dönüşüm sıcaklıkları büyük oranda kimyasal bileşime bağlıdır (Kainuma ve ark., 1996). Bu açıdan alaşımın homojen bir dağılım sergilemiş olması oldukça önemlidir.

Tel erozyon kesme parametrelerine bağlı olarak CoNiAl numunelerin kesiti incelendiğinde 2 farklı bölgenin oluştuğu dikkat çekmektedir (Resim 4.2). Literatürdeki çelikler ve Alüminyum alaşımları ve çelikler üzerinde üzerinde ise 3 farklı bölgenin oluştuğu rapor edilmiş ve bu bölgeler yüzeyden malzemenin iç kısmına doğru sırasıyla; erimiş ve yeniden katılaşan bölge, menevişlenmiş tabaka ve işlemden etkilenmemiş bölge olarak

adlandırılmıştır (Choudhary, Kumar, Garg, 2010; Ozkul, Şeker, Buldum, Akkurt, 2012). TiNiCo alaşımlarında da 3 bölge olduğu bildirilmiş ancak yapılan makale çalışması incelendiğinde bu bölgeler ile ilgili herhangi mikro yapı resmi verilmediği ve sertlik değerlerinin çelik ve alüminyumlar alaşımlarında ki gibi olmadığı görülmüştür. Çelik ve alüminyum alaşımlarında menevişlenmiş bölgenin sertliği esas metalden daha düşük iken, TiNiCo alaşımında daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Hargovind, Narendranath, Ramesh, 2018). CoNiAl alaşımında 2 bölge görülmüş olması ve menevişlenmiş bölgenin görülmemiş olması altlık malzemenin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan malzemelerden birisi olması ile ilgilidir. Çünkü CoNiAl alaşımında 2-9  $\mu\text{m}$  kalınlığında bir erimiş ve yeniden katılaşmış bölge oluşurken alüminyum alaşımlarında ısıdan etkilenen bölgenin 80-120  $\mu\text{m}$  aralığında olduğu belirtilmiştir (Çağdaş ve Haşçalık, 2004). Süper alaşımlar üzerinde ise çalışmamıza yakın kalınlıkta bir tabakanın olduğu rapor edilmiştir. Tel erozyon ile kesme işlemi dielektrik sıvı içerisinde gerçekleştiğinden plazma ve lazer kesme yöntemlerine göre daha hızlı soğuma meydana geldiği ve dolayısıyla ısıdan etkilenen bölgenin daha dar bir bölge oluşturduğu rapor edilmiştir (Ay, 2013).



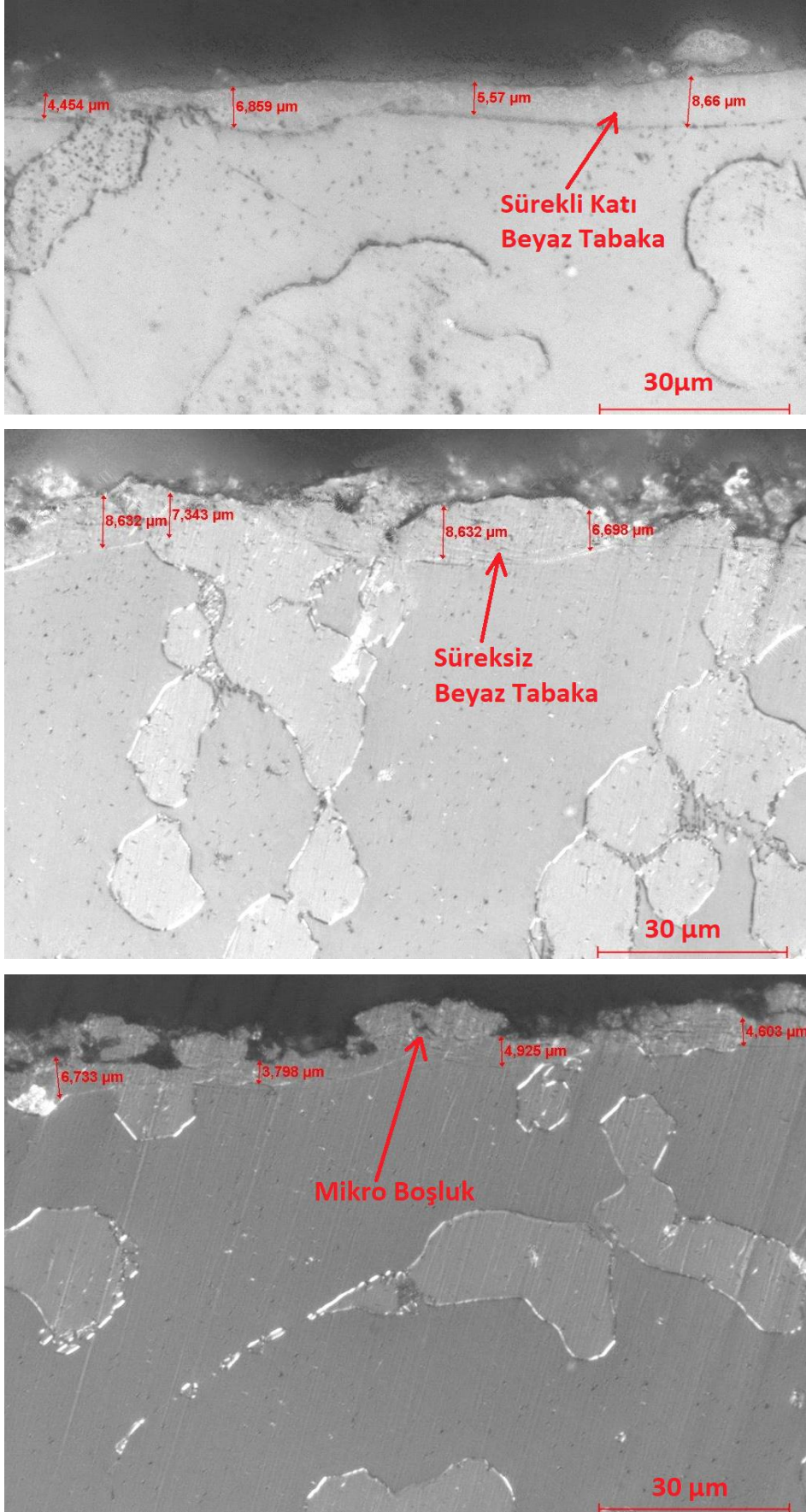
Resim 4.2. CoNiAl alaşımının kesme yüzeyinde oluşan yeniden katılaşan tabakanın Görünümü.

Tel erozyonla kesme işlemi sonucunda, kesilen yüzeyde Beyaz Tabaka (BT) olarak bilinen sert bir tabaka oluşmaktadır, Bu tabaka ana malzemeye göre daha serttir (Haşçalık, 2006),Tel erozyonla kesme parametrelerine göre Beyaz Tabaka 3-9 µm aralığında farklılık göstermektedir. Tel Erozyon Kesme Parametrelerinde elde edilen Ortalama Beyaz Tabaka Kalınlıkları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Tel Erozyon Kesme Parametrelerinde elde edilen Ortalama Beyaz Tabaka Kalınlıkları.

Sıra No	Volt (V)	Akım (A)	Puls Süresi (µs)	Ortalama Beyaz Tabaka Kalınlığı ( BT) (µs)
1	54	6	1	3,738
2	54	6	2	4,539
3	54	6	3	6,981
4	54	9	1	4,297
5	54	9	2	2,972
6	54	9	3	3,042
7	54	12	1	3,303
8	54	12	2	3,333
9	54	12	3	6,386
10	44	6	1	8,243
11	44	6	2	7,396
12	44	6	3	6,095
13	44	9	1	5,031
14	44	9	2	3,529
15	44	9	3	2,964
16	44	12	1	6,137
17	44	12	2	4,608
18	44	12	3	4,182
19	34	6	1	5,294
20	34	6	2	6,387
21	34	6	3	5,610
22	34	9	1	7,826
23	34	9	2	9,127
24	34	9	3	7,147
25	34	12	1	4,512
26	34	12	2	4,009
27	34	12	3	7,185

Beyaz Tabaka, Resim 4.3’de görüldüğü gibi sürekli ve süreksiz katı bir tabaka oluştururken bazen de içinde mikro boşluklar bulundurması tamamen tel erozyonla kesme işlemi yapılırken deşarj edilen enerjiye bağlıdır (Liu, 2014).



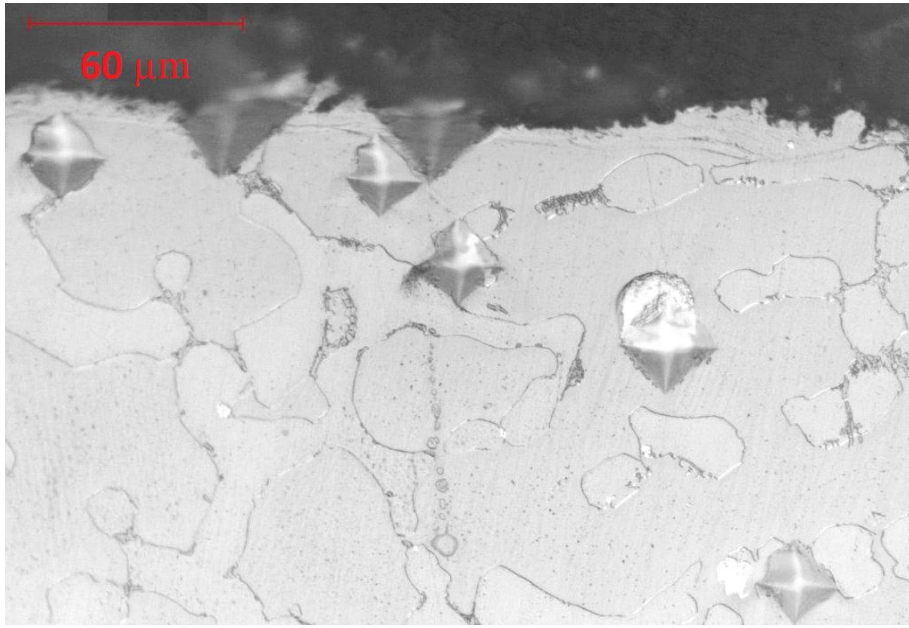
Resim 4.3. Tel Erozyon ile işleme sonucu oluşan beyaz tabaka görünümleri.



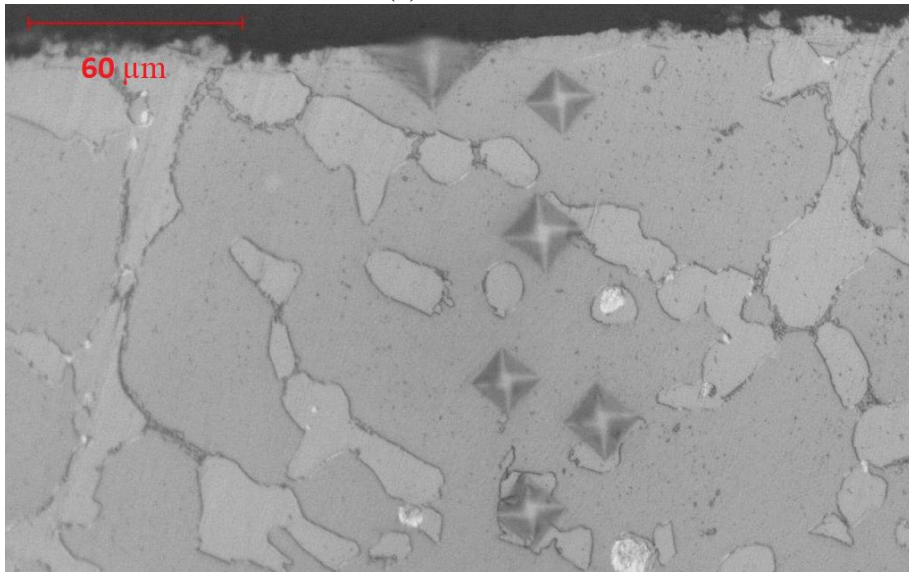
## 4.5 Sertlik Ölçme Deneyi

### 4.5.1 Mikro Sertlik Ölçümü

Numunelerin pürüzlü yüzeylerinden sertlik alma mümkün olmadığından soğuk bakalite alınmasının ardından zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulan numuneler vickers metoduyla piramid uç ve 200 gf uygulanarak kesit yüzeylerinden Şekil 3.5’de gösterildiği şekilde sertlik alınmıştır.



(a)



(b)

Resim 4.4. Tel erozyon yöntemi ile kesilen numunelerden alınan sertlik izlerinin gösterimi  
a) 20 numaralı numune b)24 numaralı numune.

CoNiAl alaşımlarının sertlik izi görünümünden görüldüğü üzere iki husus dikkat çekmektedir. Birincisi, tel erozyon sonucu oluşmuş olan ergiyip yeniden katılaşılan bölgenin ( $<10 \mu\text{m}$ ) olması ve kesme sırasında ısınma ve hızlı soğuma sonucu yüzey sert fazların oluşumundan dolayı 200 gf yük altında kırılması dolayısıyla bu yeniden katılaşılan bölgeden (beyaz tabaka bölgesinden) mikro sertlik değerleri sağlıklı bir şekilde ölçülememiştir. Bu durum, oluşan bu bölgenin 2-10  $\mu\text{m}$  aralığında (küçük olması) ve yeniden katılaşılan bölgenin kılcal çatlaklar, mikro boşluklar ve küresel talaş yığınlarından (Hargovind, Narendranath, Ramesh, 2018) kaynaklandığı düşünülmektedir, Bu bölgenin nano indentasyon tekniği ile belirlenen sertlik değerleri bir sonraki bölümde verilmiştir.

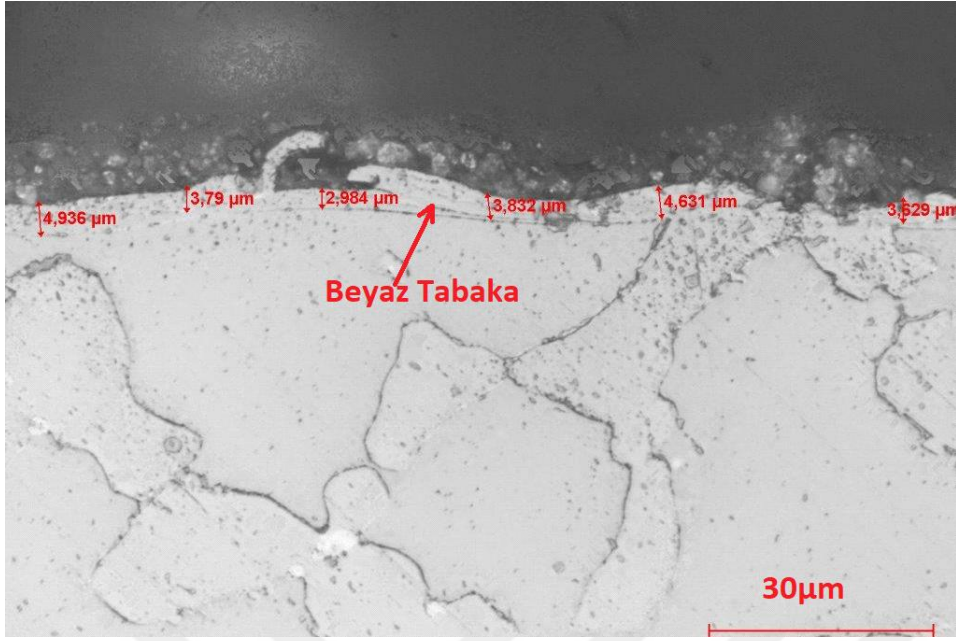
Bir diğer husus ise sertlik haritası üzerinde farklı büyüklükte sertlik izlerinin görünmesidir. Bu durum optik görünümde ve XRD analizlerinde de tespit edilen  $\beta$  ve  $\gamma$  fazlarının farklı sertlik değerlerine sahip olması sonucu sertlik alınan bölgedeki faza bağlı olarak sertlik değerlerinde değişikliğe neden olmuştur (Choi ve Sia 2006; Ata, 2018).

#### 4.5.2 Nano İndentasyon

Beyaz tabaka da oluşan sertlik değerleri mikro sertlik cihazıyla ölçülmek istenmesine rağmen tabaka kalınlıkları ölçüm için yeterli genişlikte olmadığından ölçüm yapılamamıştır. Kalınlığı yaklaşık olarak 3-9  $\mu\text{m}$  aralığında olan beyaz tabakanın sertlik değerlerini nanoindenter ile tespit edilmiştir.

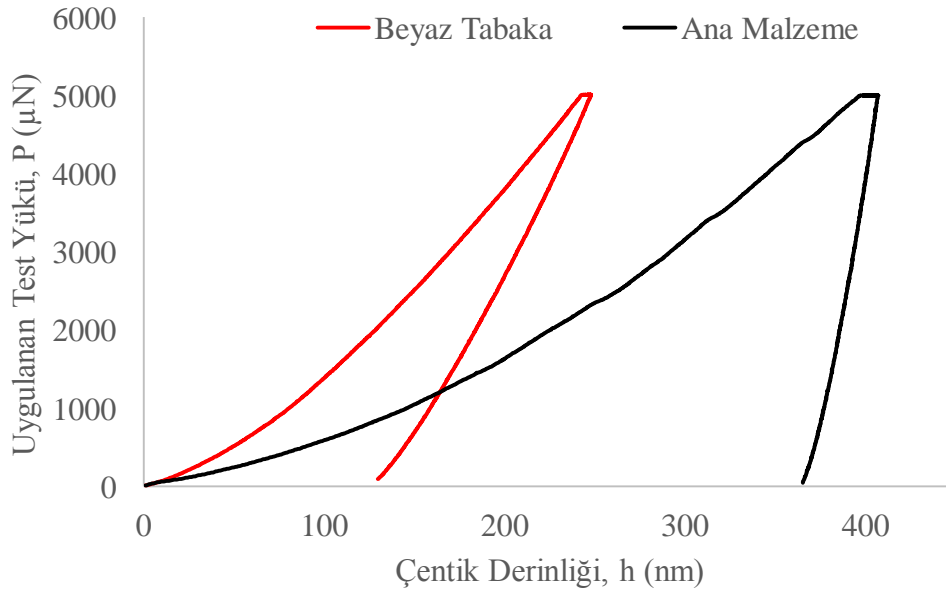
Bu bölümde, tel erozyon ile kesilmiş 4 ve 21 numaralı numuneler için nano sertlik deneylerinden elde edilen veriler incelenip analizleri yapılmıştır. Bu bölümde her bir numune için önce beyaz tabaka ve ana malzeme görünümleri ardından ayrı ayrı yük-yer değiştirme eğrileri ve her bir numuneden taramalı uç mikroskobu (SPM) ile elde edilen yüzey topoğrafyası görüntüleri verilmiştir.

Beyaz tabaka kalınlığı 3-5  $\mu\text{m}$  aralığında olan 4 numaralı numune ince beyaz tabaka incelemeleri için seçilmiştir. Resim 4.5'de 4 numaralı numunenin beyaz tabaka kalınlık değişimleri görülmektedir. Tabaka kalınlıkları yer yer düzenli bir yapıya sahip olsa da genel itibarla homojen bir dağılım göstermemiştir.



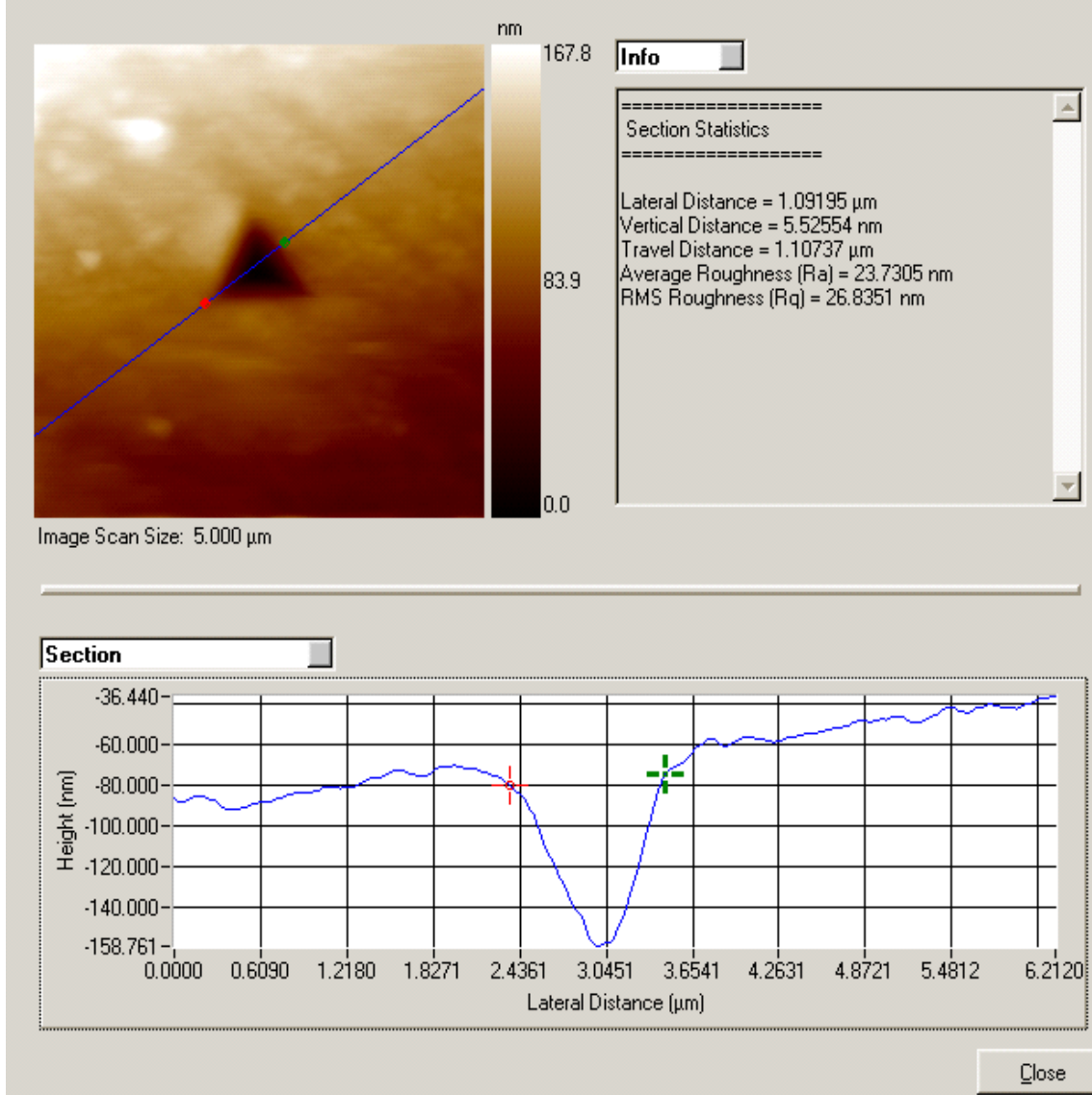
Resim 4.5. 4 numaralı numune görünümü.

Şekil 4.5'de 4 numaralı numunenin 5000 N test yüküne bağlı çentik derinliğinin değişimi ana malzeme ve beyaz tabaka için ayrı ayrı görülmektedir. Şekilde görüleceği üzere beyaz tabaka için 1000 ile 5000 N'luk yük-yer değiştirme eğrisinin yüklenme ve yük boşaltma kısımlarında oldukça düzenli olduğu anlaşılmaktadır. Ana malzemede ise aynı yüklenme koşullarında daha fazla yer değiştirmenin olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.5. 4 numaralı numunenin yük-yer değiştirme eğrisi.

CoNiAl alaşımının 4 numaralı numuneye çentik atıldıktan sonra alınan SPM görüntüsü ve çentiğin ayrıntılı analizi beyaz tabaka için Resim 4.6’da ana malzeme için ise Resim 4.7’de verilmektedir. İnceleme de plastik deformasyon meydana geldiği görülürken yüzeyde herhangi bir çatlak olmadığı tespit edilmiştir.



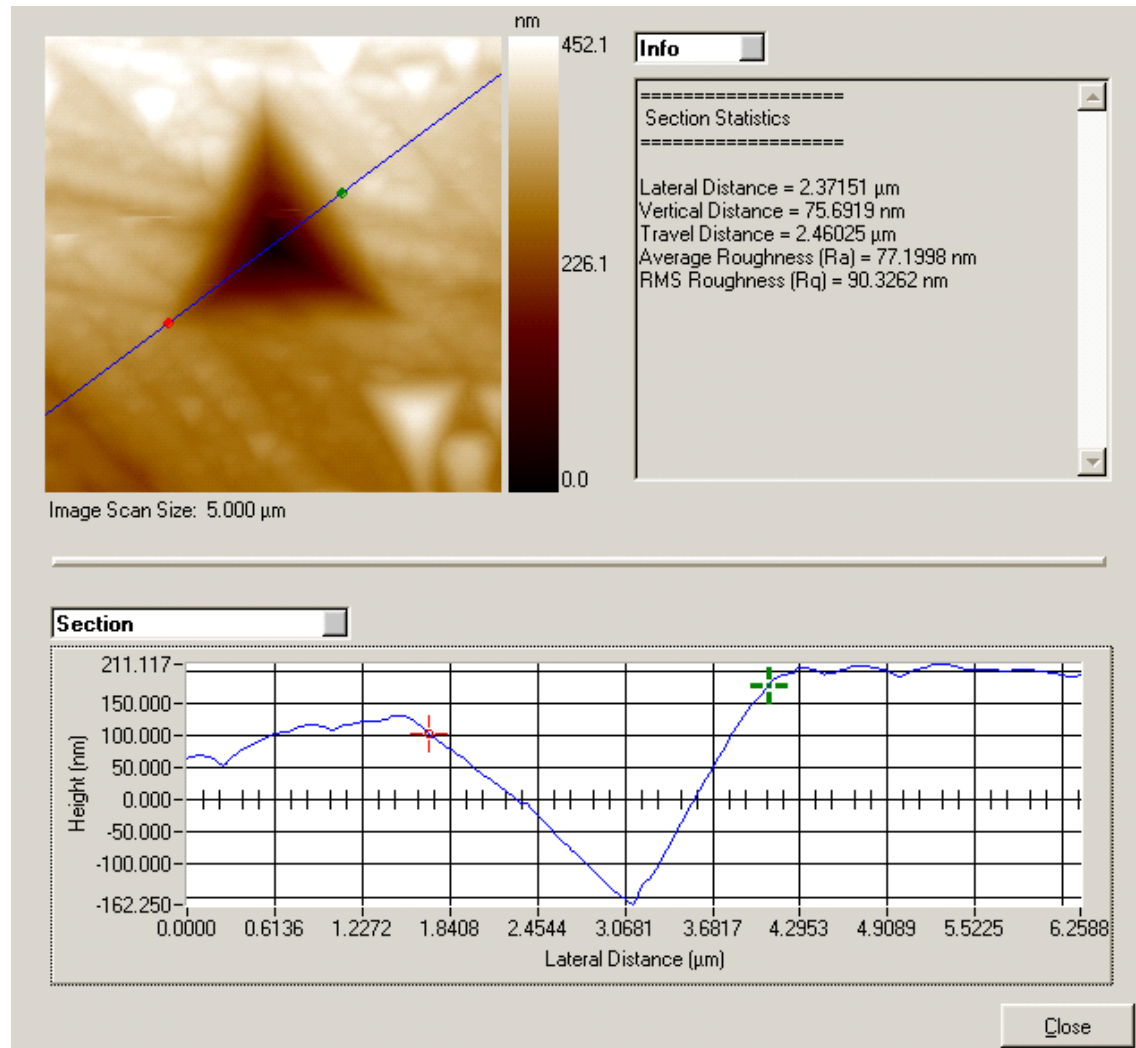
Resim 4.6. 4 numaralı numunenin beyaz tabakasında oluşturulan entiğin SPM Görüntüsünün analizi.

Resim 4.6’da SPM görüntüsünün üzerinde belirlenen beyaz tabakanın analizi ve kesit görüntüsü verilmektedir. Yüzeydeki ortalama pürüzlülük (Ra) değeri 23,7305 nm olup RMS (ortalama karekök) pürüzlülük 26,8311 nm’dir. Kesitten ve SPM görüntüsünden açıkça görüleceği üzere yığılma (pile-up) görülmemektedir. Meydana gelen yüzey

pürüzlülüğünün mekanik parlatmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 4.9'da 4 numaralı numunenin beyaz tabakadan deney sonrası elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 4.9. 4 numaralı numunenin beyaz tabakasının mekanik değerleri.

hc(nm)	Pmax( $\mu$ N)	S( $\mu$ N/nm)	A(nm <sup>2</sup> )	hmax(nm)	H(GPa)
174,331359	5008,916685	50,6061	1060414,281	247,761523	4,723547



Resim 4.7. 4 numaralı numunenin ana malzemede oluşturulan çentiğin SPM Görüntüsünün analizi.

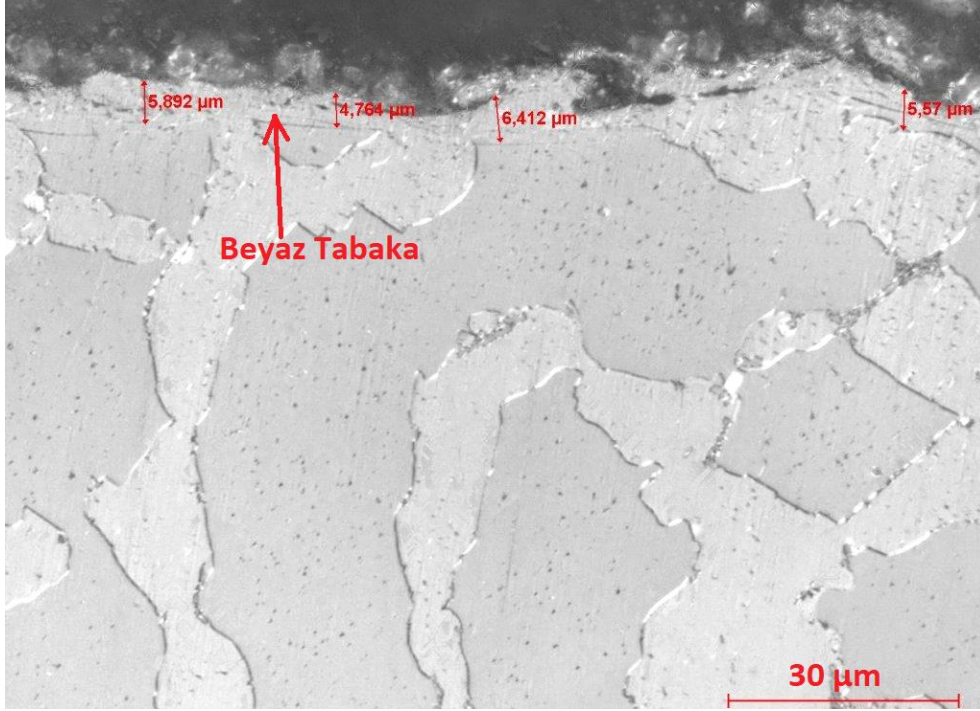
Şekil 4.7'de SPM görüntüsünün üzerinde belirlenen ana malzemenin analizi ve kesit görüntüsü verilmektedir. Yüzeydeki ortalama pürüzlülük (Ra) değeri 77,1998 nm olup RMS (ortalama karekök) pürüzlülük 90,3262 nm'dir. Kesitten ve SPM görüntüsünden açıkça görüleceği üzere yığılma (pile-up) görülmemektedir. Meydana gelen yüzey

pürüzlülüğünün mekanik parlatmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 4.10'da 4 numaralı numunenin ana malzemenin deney sonrası elde edilen sonuçlar görülmektedir.

Çizelge 4.10. 4 numaralı numunenin ana malzemenin mekanik değerleri.

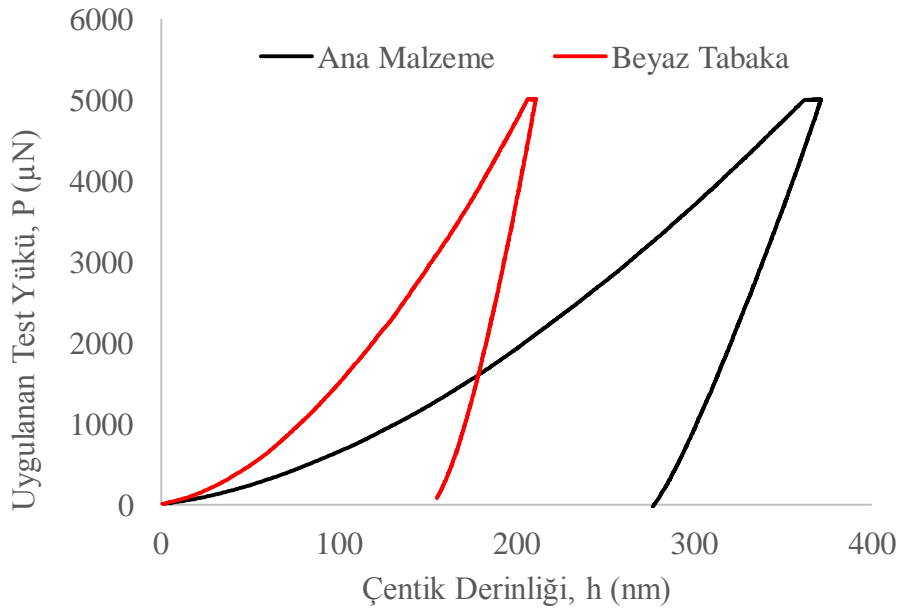
hc(nm)	Pmax( $\mu$ N)	S( $\mu$ N/nm)	A(nm <sup>2</sup> )	hmax(nm)	H(GPa)
383,300827	4999,173152	158,393917	4297769,624	407,01886	1,163202

Beyaz tabaka kalınlığı 5-7  $\mu$ m aralığında olan 21 numaralı numune kalın beyaz tabaka incelemeleri için seçilmiştir. Resim 4.8'de 21 numaralı numunenin beyaz tabaka kalınlık değişimleri görülmektedir. Tabaka kalınlıkları homojen bir dağılım göstermemiştir.



Resim 4.8. 21 numaralı numune görünümü.

Şekil 4.9'de 21 numaralı numunenin 5000 N test yüküne bağlı çentik derinliğinin değişimi ana malzeme ve beyaz tabaka için ayrı ayrı görülmektedir. Şekilde görüleceği üzere beyaz tabaka için 1000 ile 5000 N'luk yük-yer değiştirme eğrisinin yüklenme ve yük boşaltma kısımlarında oldukça düzenli olduğu anlaşılmaktadır. Ana malzemede ise aynı yüklenme koşullarında daha fazla yer değiştirmenin olduğu açıkça görülmektedir.



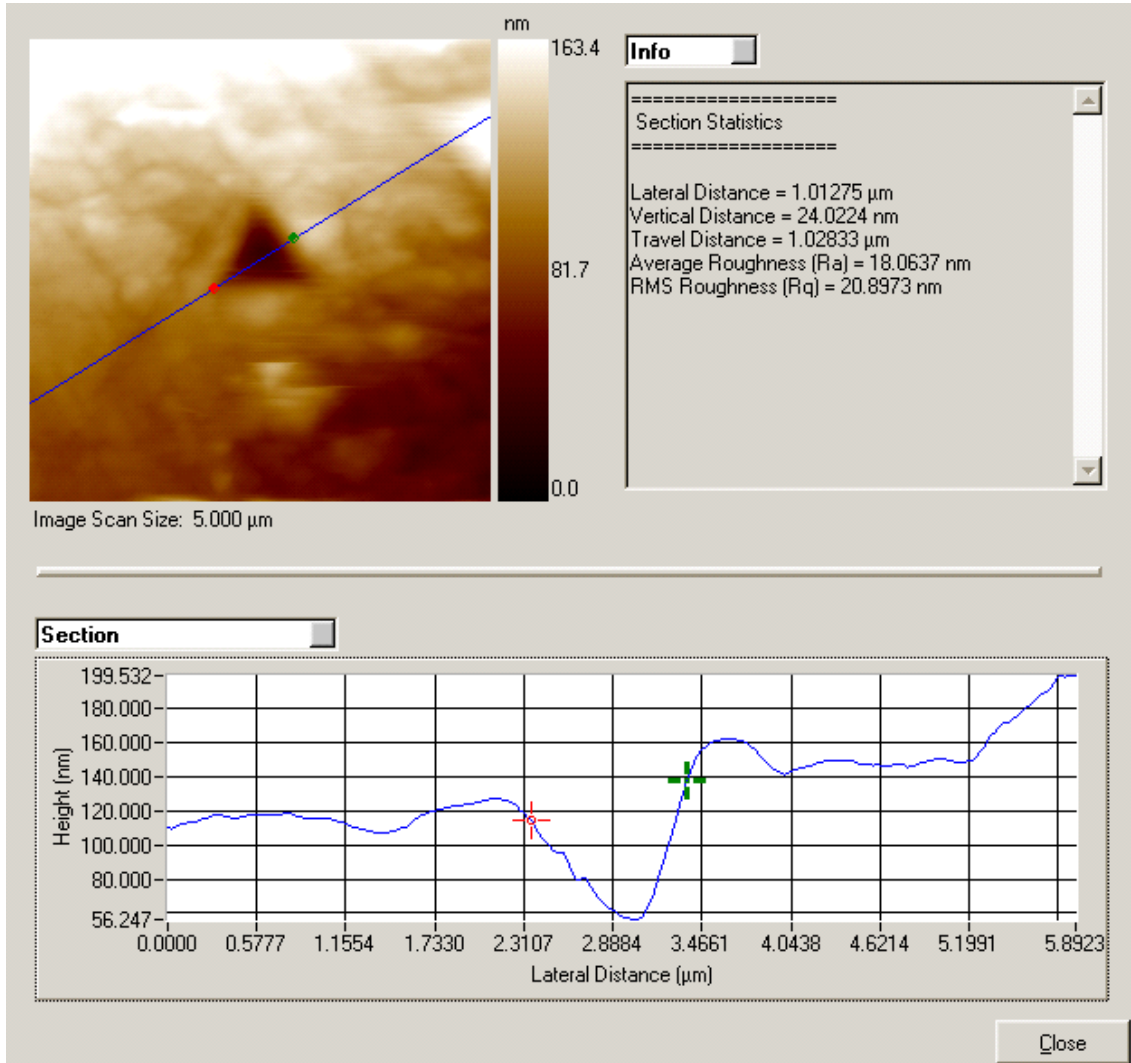
Resim 4.9. 21 numaralı numunenin yük-yer değiştirme eğrisi.

CoNiAl alaşımının 21 numaralı numuneye çentik atıldıktan sonra alınan SPM görüntüsü ve çentiğin ayrıntılı analizi beyaz tabaka için Resim 4.10'da ana malzeme için ise Resim 4.11'de verilmektedir. İnceleme de plastik deformasyon meydana geldiği görülürken yüzeyde herhangi bir çatlak olmadığı tespit edilmiştir.

Resim 4.10'da SPM görüntüsünün üzerinde belirlenen beyaz tabakanın analizi ve kesit görüntüsü verilmektedir. Yüzeydeki ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerı 18,0637 nm olup RMS (ortalama karekök) pürüzlülük 20,8973 nm'dir. Kesitten ve SPM görüntüsünden açıkça görüleceği üzere yığılma (pile-up) görülmemektedir. Meydana gelen yüzey pürüzlülüğünün mekanik parlatmadan kaynaklandığı düşünölmektedir, Çizelge 4.11'de 4 numaralı numunenin beyaz tabakadan deney sonrası elde edilen sonuçlar görölmektedir.

Çizelge 4.11. 4 numaralı numunenin beyaz tabakasının mekanik değerleri.

<b>hc(nm)</b>	<b>Pmax(µN)</b>	<b>S(µN/nm)</b>	<b>A(nm<sup>2</sup>)</b>	<b>hmax(nm)</b>	<b>H(GPa)</b>
179,753928	5011,333636	120,682002	1117308,231	210,889753	4,485185



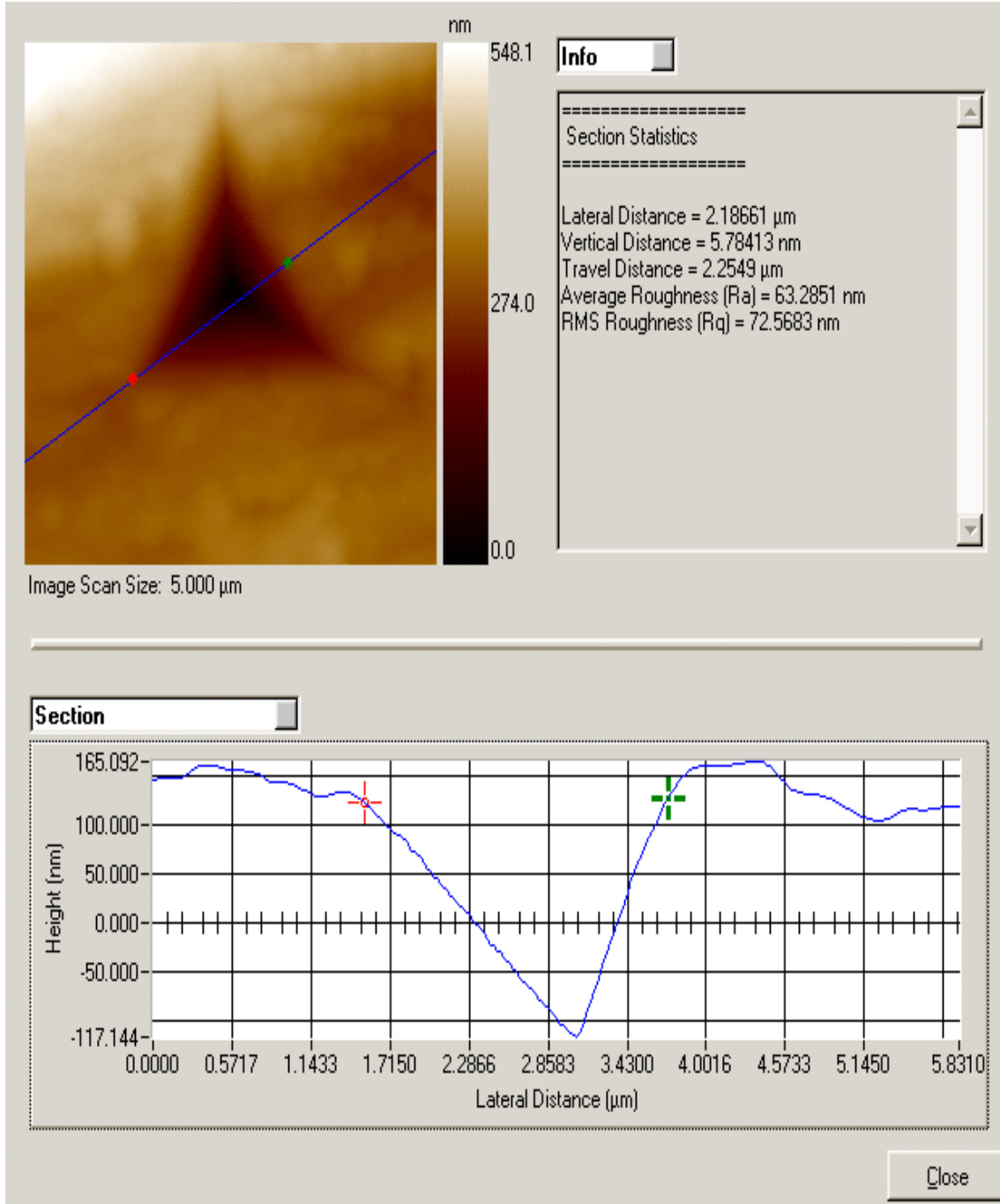
Resim 4.10. 21 numaralı numunenin beyaz tabakada oluşturulan çentiğın SPM Görüntüsünün analizi.

Resim 4.11’de SPM görüntüsünün üzerinde belirlenen ana malzemenin analizi ve kesit görüntüsü verilmektedir. Yüzeydeki ortalama pürüzlülük (Ra) değeri 77,1998 nm olup RMS (ortalama karekök) pürüzlülük 90,3262 nm’dir. Kesitten ve SPM görüntüsünden açıkça görüleceği üzere yığılma (pile-up) görülmemektedir. Meydana gelen yüzey pürüzlülüğünün mekanik parlatmadan kaynaklandığı düşünülmektedir (Çizelge 4.12).

Çizelge 4.12. 4 numaralı numunenin ana malzemenin mekanik değerleri.

hc(nm)	Pmax(µN)	S(µN/nm)	A(nm <sup>2</sup> )	hmax(nm)	H(GPa)
311,934046	5003,494121	62,747639	2951060,757	371,341116	1,69549



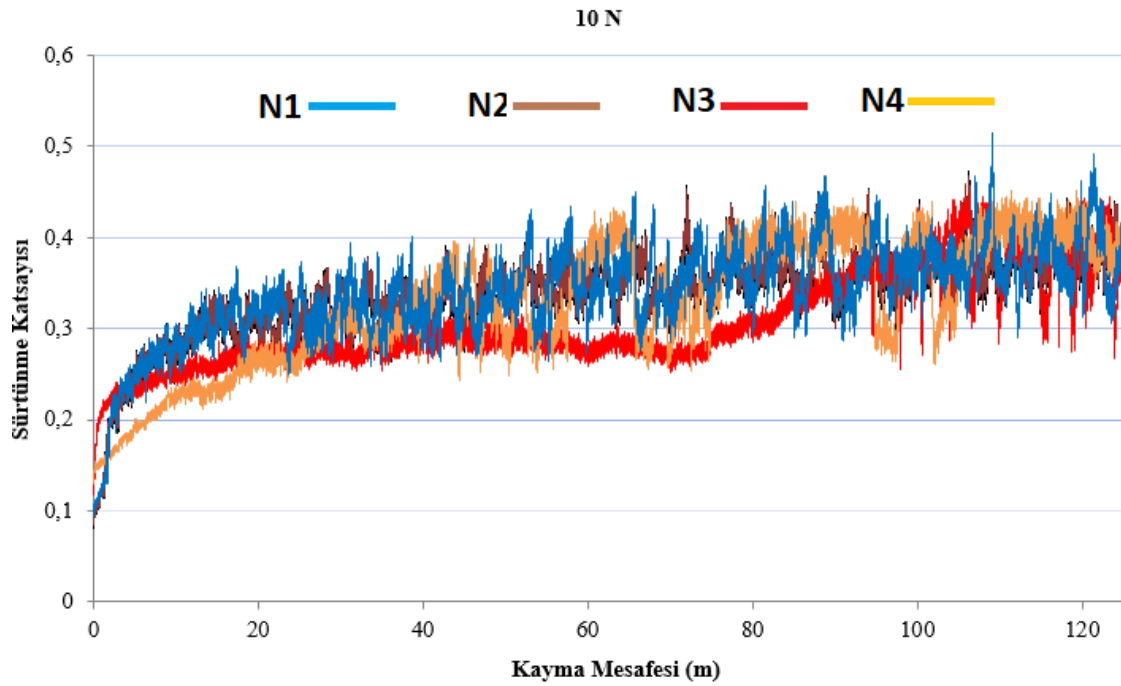


Resim 4.11. 21 numaralı numunenin ana malzemede oluşturulan çentiğin SPM Görüntüsünün analizi.

## 4.6 Aşınma Deneyleri

### 4.6.1 Sürtünme katsayısı ve Aşınma İzlerinin Karakterizasyonu

Şekil 4.6'da 5 N yük altında ve 125 m kayma mesafesi boyunca aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin yüzeyinden aşınma cihazı tarafından otomatik olarak kayıt edilen sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.6. 5 N yük altında 125 m boyunca lineer aşınma testine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısı grafiği.

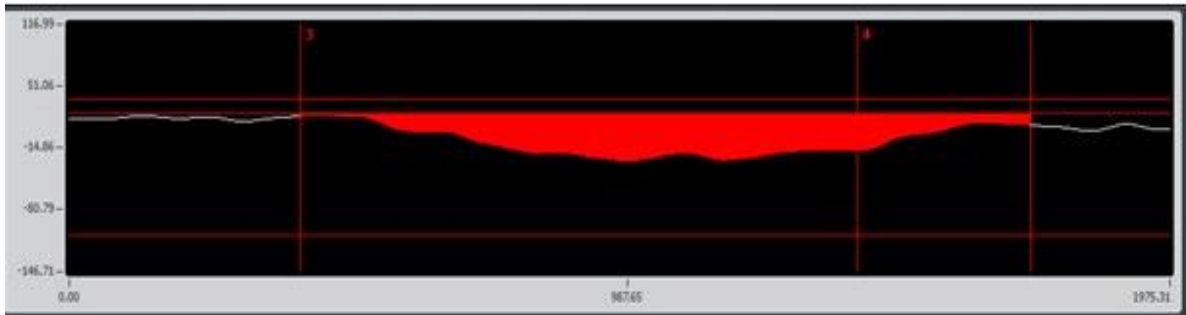
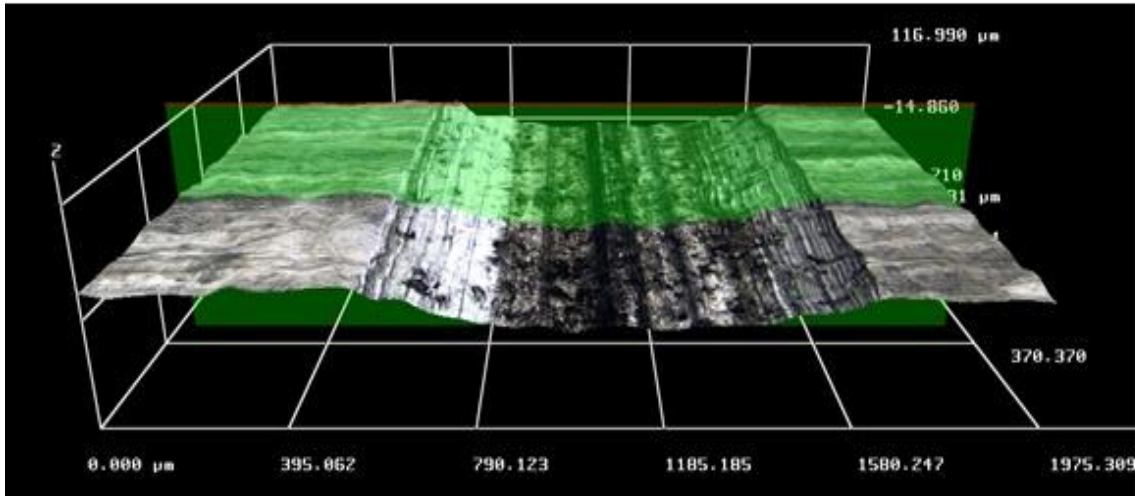
Şekil 4.6 incelendiğinde, N1 ve N2 (hassas kesme ile kesilen ve yüzeyleri parlatılmış numuneler) numunelerinin sürtünme katsayısı başlangıcı 0,1'in altında iken tel erozyon ile kesilen N3 ve N4 (N3: yeniden katılaştıran bölgenin en düşük olduğu, N4: yeniden katılaştıran bölgenin en büyük olduğu) numunelerinde sürtünme katsayısı grafiğinin başlangıcı ise 0,15 üzerinden başlamıştır. Bu durum numunelerin sahip olduğu yüzey pürüzlülüklerinin önemli bir yere sahip olduğunu göstermektedir.

0-5 m aralığında tüm numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri hızlı bir artış eğilimi sergilemiştir. 5-25 m arasındaki sürede tel erozyon ile kesilmiş numunelerin daha düşük sürtünme katsayısı grafiğine sahip oldukları gözlemlenmiştir. Bu durum tel erozyon

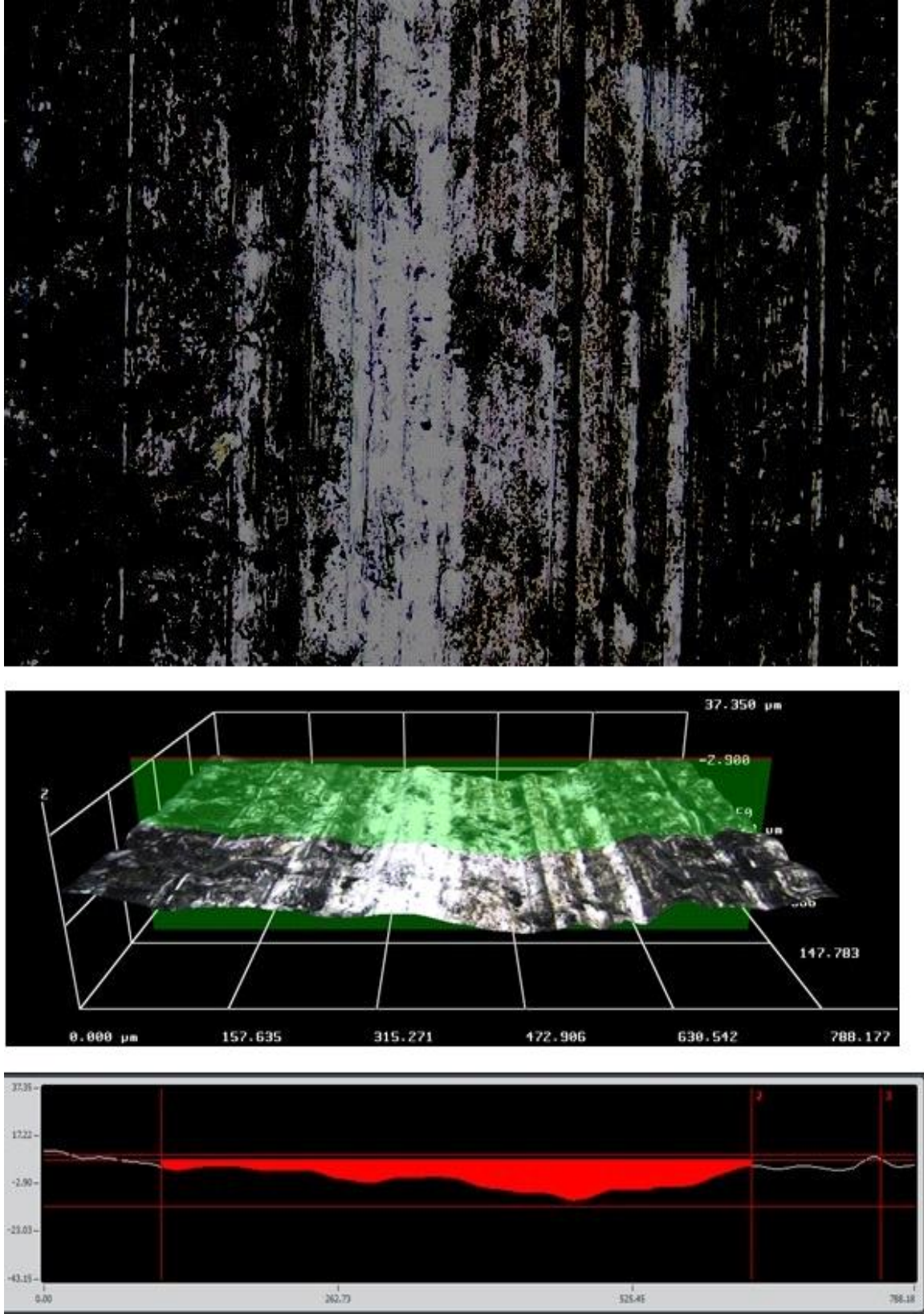
işlemi sırasında yüzeyde oluşturulan yeniden katılaşmış bölgenin sertlik ölçümlerinde de belirtildiği üzere daha yüksek olması sebebiyledir. Sertlik artışına bağlı olarak aşındırıcı bilyenin malzemeye batması azalmıştır (Gök ve ark., 2017; Günen ve ark., 2017). Buda malzemedenden daha az malzeme kopmasına katkıda bulunmuştur.

Numune özelinde sürtünme katsayısı grafikleri incelendiğinde işlemsiz numunelerin (N1 ve N2) sürtünme katsayısı grafikleri devamlı bir artış eğilimindedir. Bu durum aşınma işleminde sürenin artışına bağlı olarak yüzeyde meydana gelen aşındırıcı partiküllerin aşınan yüzey ile bilye arasında kalması ve aşınma işlemini artırması ile ilgilidir. En düşük sürtünme katsayısı grafiğinin elde edildiği N4 numunesinin sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde 85 m'ye kadar düşük ve stabil bir grafik sergilemiş iken 85-100 aralığında ani bir artış eğilimi göstermiştir. 85 m'ye kadar yüzeyde tel erozyon ile oluşturulan yeniden kristalleşen tabakanın varlığını koruduğu 85 m'den sonra ise aşınmaya (kırılan) başlayan tabakanın altlıktan daha sert olması sebebiyle aşındırıcı (abrasive) partikül olarak vazife gördüğü ve 85-100 m arasında ise sürtünme katsayısı grafiğini hızlı bir biçimde artırdığı düşünülmektedir. N3 numunesi 50 m'ye kadar işlemsiz numuneden daha düşük bir sürtünme katsayısı grafiği sergilemiştir. Yüzeyde oluşan tabakanın kırılması ile sürtünme katsayısı artış eğilimi göstermiştir. Bu numunede dikkat çeken husus sürtünme katsayısı grafiğinin işlemsiz numuneler N4 numunesine göre aşırı dalgalı olmasıdır. Bu durum tel erozyonu sonucu çok küçük oluşmuş olan yeniden kristalleşmiş bölge kalıntılarının bilye ile teması sırasında düşük sürtünme katsayısı sergilerken diğer tarafından ise altlık malzemedeki sert ve yumuşak fazlara temasıdır,

Resim 4.12 ve Resim 4.13'de sırasıyla aşınma işlemi en yüksek ve en düşük ortalama sürtünme katsayısı değerlerinin elde edildiği numunelerin yüzeyinden alınan 3D aşınma iz görüntüleri verilmiştir.



Resim 4.12. N1 numunesinin yüzeyinden alınan 3D aşınma iz görünümü.



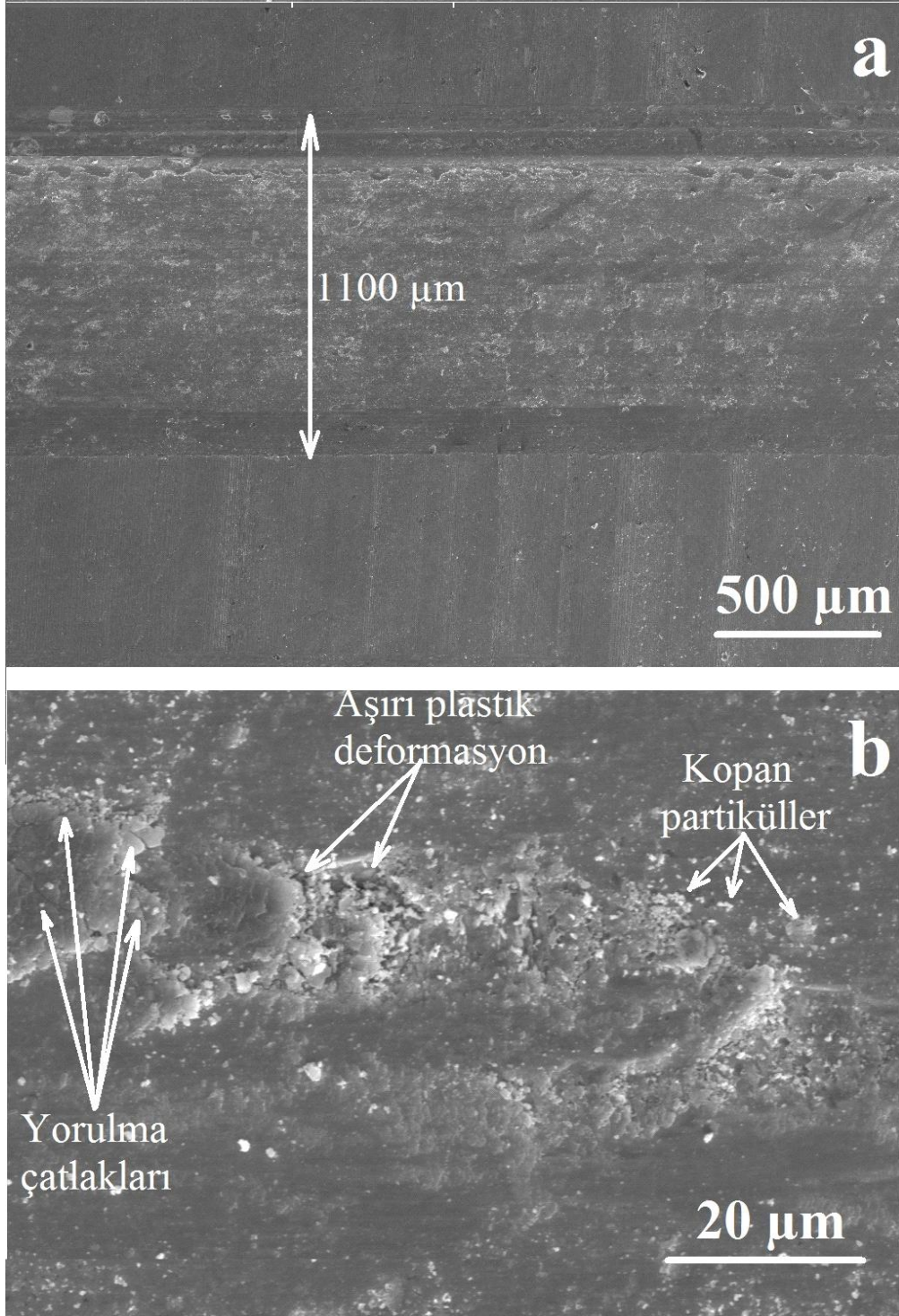
Resim 4.13. N4 numunesinin yüzeyinden alınan 3D aşınma iz görünümü.

3D aşınma iz görünümünden görüldüğü üzere, tel erozyon ile kesilmiş numunenin yüzeyinde daha yüzeysel zig-zaglı (bazı kısımlar derin bazı kısımlar yüzeysel) bir görünüm elde edilmiş iken hassas kesme ile kesilen numunede ise yarım elips şeklinde daha homojen görünüme sahip bir yüzey morfolojisi elde edilmiştir. Bu durum tel erozyon ile kesilen numunelerde farklı sertliklere sahip olmasının bir sonucudur. Çünkü yeniden kristalleşen bölgenin, süper alaşımın içerisindeki farklı fazların ve ısıdan etkilenen bölgelerdeki sertlik değeri farklı değerlere sahiptir. Buda numunenin her tarafının eşit derinlik ve/veya genişlikte aşınmamış olmasını sağlar. Bu durum şöyle açıklanabilir; sertlik artışına bağlı olarak, aşındırıcının sert bölgelere çok daha az batmasına ve nispeten yumuşak bölgeleri daha çok aşındırması sonucu düzensiz bir aşınma morfolojisi oluşturmasına atfedilebilir. Benzer durum termo reaktif difüzyon tekniği ile üretilen kaplama çalışmalarının aşınma dirençlerinin analizinde de bir çok çalışmada belirtilmiştir (Bozali, Yaşar, Günen, 2015; Kurt ve ark., 2018). Öte yandan tel erozyon işlemi sonucu yüzeyde sert bir bölgenin olduğu numunede meydana gelen aşınmış bölgenin alanın hassas kesme işlemi ile kesilen numunedekine göre 10 kat daha az olduğu tespit edilmiştir.

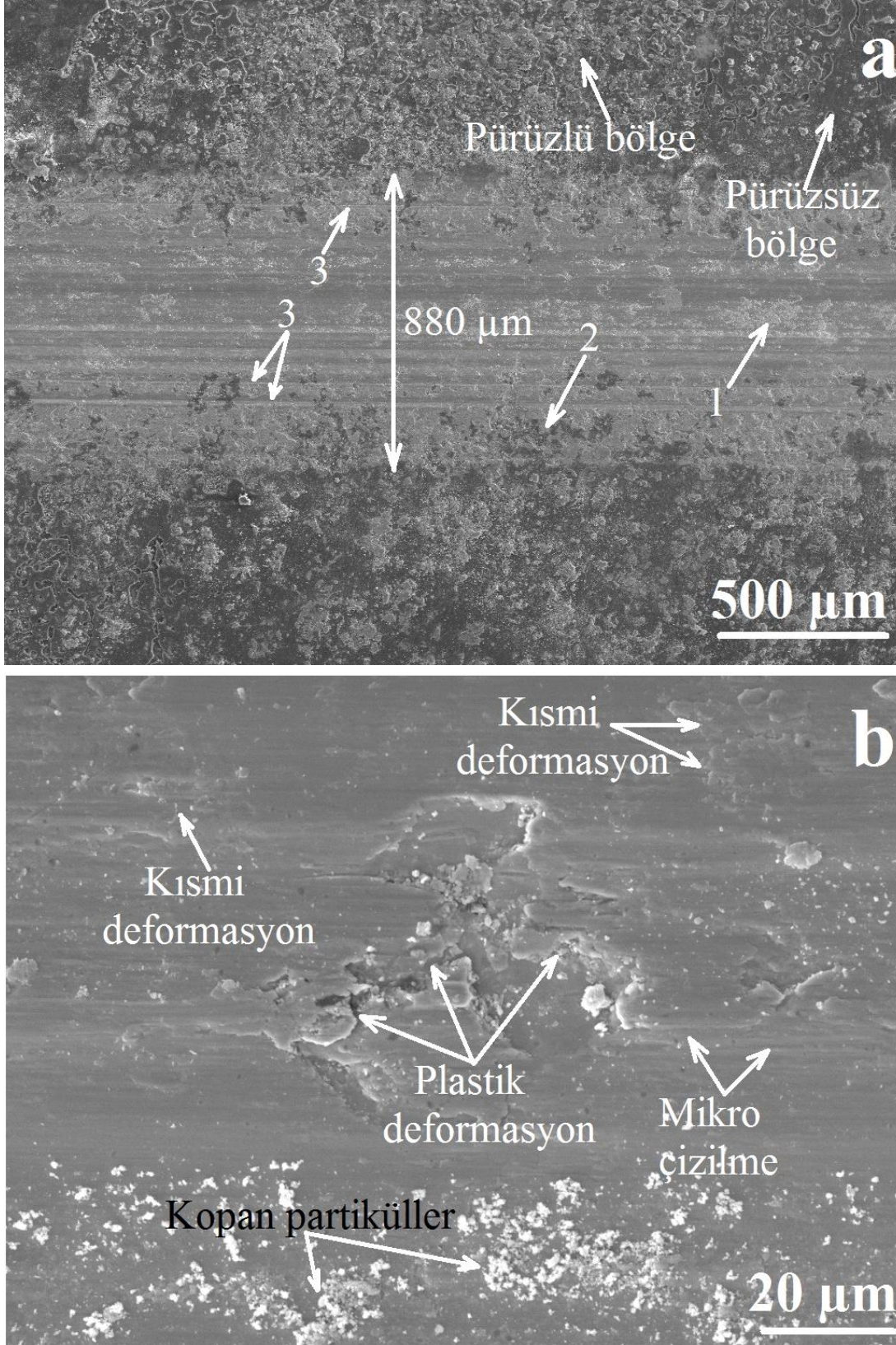
Alaşımın ve kaplama tabakalarının aşınma tiplerinin özelliklerinin belirlenmesinde önemli hususlardan bir diğeri de aşınma sonrası numunelerin yüzeylerinde oluşan izlerin karakterize edilmesidir (Çürük, 2017). Değişik yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip numunelerin aşınma deneyleri sonrası yüzeylerdeki izlerin yorumlanması amacıyla numunelerin yüzeyi SEM ile incelenmiştir. N1 ve N4 numunelerinin yüzeyinden alınan aşınma izi görünümleri Resim 4.14 ve Resim 4.15’de verilmiştir.

Aşındırma işleminden sonra N1 numunesinin yüzeyinden 100X büyütme (Resim 4.14 a) ile alınan SEM aşınma izi fotoğrafı incelendiğinde koyu ve açık olmak üzere iki farklı kontrast sahip bölgeler göze çarpmaktadır. Bu bölgelerin daha iyi anlaşılabilmesi için 3000X büyütmede numune yüzeyinden alınan SEM aşınma izi incelendiğinde (Resim 4.14 b) yapının tekrarlı yükler altında yorulmaya bağlı hasara uğradığı anlaşılmaktadır. Ok ile gösterilen bölgelerde numunenin yorulma sonucu küçük çatlamlar gösterdiği sonrasında bu çatlamların yüzeyden koparak numuneyi hasara uğrattığı ve aşınma mekanizmasının aşırı plastik deformasyona döndüğü görülmektedir. Ayrıca aşınma atığı şeklinde yüzeyde bulunan partiküllerin bir kısmının tekrar yüzeye gömüldüğü anlaşılmaktadır. Bu partiküllerin sürtünme katsayısını artırdığı ve aşınma oranlarını

artırdığı birçok araştırmacı tarafından farklı alaşımlardaki çalışmalarda belirtilmiştir (Korshunov ve Chernenko, 2014; Gök ve ark., 2017; Günen ve ark., 2018; Yapıcı ve ark., 2019).



Resim 4.14. 5 N yük ve 125 m kayma mesafesi ile aşınma işlemine tabi tutulan N1 Numunesinin SEM aşınma yüzey görünümü.



Resim 4.15. 5N yük ve 125 m kayma mesafesi ile aşınma işlemine tabi tutulan N4 Numunesinin SEM aşınma yüzey görünümü.



Tel erozyon ile kesme işleminden sonra aşındırma işlemine tabi tutulan numunenin 100X büyüklüğünde aşınma yüzeyinden alınan SEM fotoğrafı incelendiğinde aşınma yüzeyini 3 farklı bölgede incelemek mümkündür. Bunlar 100X fotoğrafın üzerinde 1,2 ve 3 rakamları ile belirtilmiştir. Resim 15’de 100X büyütme ile ifade edilen bölgenin 3000X’deki görüntüleri Resim 4.15 b’de tekrar verilmiştir. Bu bölgelerin aşırı plastik deformasyona uğrayarak mikron seviyesinde yüzeyden kopan aşınma atıklarından oluştuğu anlaşılmaktadır. İki ile ifade edilen bölgenin 3000X’deki fotoğrafı incelendiğinde bu bölgenin nispeten daha pürüzsüz oluştuğu ancak kısmen yüzeyden plastik deformasyonla partiküllerin koptuğu anlaşılmaktadır. 3’ü bölgede ise yüzeyde mikro çiziklerin oluştuğu anlaşılmaktadır (Beake ve ark., 2017; Machado ve ark., 2017). Bu çiziklere aşındırıcı bilye ile yüzey arasına sıkışan aşınma partiküllerinin (yeniden kristalleşen bölgeden kopan daha sert partiküllerin) sebep olduğu düşünülmektedir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında son yılların popüler şekil hafızalı alaşımlarından olan CoNiAl alaşımının vakumlu döküm yoluyla üretimi, üretilen numunelerin optik, XRD, DSC analizleri yapıldıktan sonra farklı parametreler ile tel erozyon tezgâhın kesme işlemine tabi tutulmuştur. Tez konusunun odaklandığı kısım ise kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey özellikleri ve aşınma dirençlerine etkisinin incelenmesidir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Alaşımın üretiminde ergitme işlemlerinde vakum indüksiyon ocağı (Balzers VSG02) ve zirkonya esaslı pota (ZR93TC) kullanılmıştır. Döküm işlemi esnasında, Co ve Ni elementleri pota içerisinde yerleştirilirken katkı bölmesine ise Al, Si ve Cu alaşımları yerleştirilmiştir. Vakumlama işleminin ardından 200 Torr Ar atmosferinde Co ve Ni'in ergitme işlemi yapıldı. Ardından pota içerisindeki Al, Si ve Cu ilave edilerek döküm sıcaklığına (1650-1750 °C) geldiğinde ise kapak açılarak önceden 1500-1600 C° ısıtılmış seramik kalıba döküm yapıldı.

1. Şekil hafızalı CoNiAl alaşımı vakum indüksiyon ocağında zirkonyum esaslı potada başarılı bir şekilde üretilmiştir. Alaşımın kimyasal kompozisyonu  $Co_{43,83}Ni_{41,14}Al_{9,88}Cu_{4,96}$  şeklindedir.
2. XRD analiz sonucunda yapının bcc yapıya sahip  $\beta$  östenit fazı, fcc yapıya sahip yüksek sıcaklık fazı  $\gamma$  ve bct yapıya sahip L10 martenzitik  $\beta'$  3 faz bir yapı tespit edilmiştir.
3. DSC eğrilerinden alaşımın  $A_{max}-M_{max}$  sıcaklık farkının 35,41°C olduğu;  $A_f$ ,  $A_s$  ve  $A_{max}$ ,  $M_f$ ,  $M_s$  ve  $M_{max}$  dönüşüm sıcaklıklarının sırasıyla 22°C, 80°C, 100°C, 55,04, 88 °C ve 64,81°C olduğu tespit edilmiştir.
4. Tel erozyonla kesme parametrelerinin, yüzey pürüzlülük değerlerinden  $R_a$ 'yı 2,06-3,18  $\mu m$  ve yeniden kristalleşen tabaka kalınlığını 2,96-9,13  $\mu m$  aralığında değişmelerini etkilediğini göstermiştir.
5. GEP sonucu eğitim ve test verilerine ait korelasyon katsayılarının 0,764 ve 0,689 olarak tespit edilmiş ve model değerlerinin çoğunlukla hedef değerler etrafında kümeleniği tespit edilmiştir.

6. CoNiAl alaşımının optik görünümünün tipik dentritik bir morfolojiye sahip olduğu ve yapının  $\beta$  ve  $\gamma$  fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir.
7. Tel erozyon kesme parametrelerine bağlı olarak CoNiAl numunelerin kesiti incelendiğinde elik ve alüminyum alaşımlarına göre ısıdan etkilenen bölgenin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
8. Mikro sertlik değerleri bakımından en yüksek sertlik değerlerinin yeniden katılaşan bölgede olduğu bu bölgenin dışında çeliklerde görülen menevişlenmiş bölgenin olmadığı sonucuna varılmıştır.
9. Süper alaşımlar üzerinde ise çalışmamıza yakın kalınlıkta bir tabakanın oluştuğu rapor edilmiştir. Tel erozyon ile kesme işlemi dielektrik sıvı içerisinde gerçekleştiğinden plazma ve lazer kesme yöntemlerine göre daha hızlı soğuma meydana geldiği ve dolayısıyla ısıdan etkilenen bölgenin daha dar bir bölge oluşturduğu rapor edilmiştir.
10. Tel erozyon ile kesilen numunelerin sürtünme katsayısı başlangıç değerleri hassas kesme ile kesilen numunelerden daha yüksek başlamış ancak 5-100 m aralığında daha düşük seyretmiştir. Yeniden katılaşan 10  $\mu\text{m}$ 'lik bölgenin ortadan kalması sonucu tel erozyon ile kesilen numuneler 100-125 m aralığında hassas kesme ile kesilen numuneler ile aynı seyirde izlemiştir.
11. Tel erozyon ile kesilen numunelerin aşınma iz alanları hassas kesme ile kesilen numunelere göre 10 kat daha düşük olmuştur.
12. Aşınma mekanizması olarak hassas kesme ile kesilen numunelerde plastik deformasyon mekanizması etken iken tel erozyon ile kesilen numunelerde plastik deformasyonun yanında mikro çizilme aşınma mekanizmasının da bulunduğu karışık tip (mixed type) aşınma tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Akdoğan, A., (2004). Akıllı Malzemeler. MakinaTek, Sayı 85, İstanbul.
- Akis, A. Ç. (2012). Şekil Hafızalı Co-Ni-Al-Si Alaşımında Yaşlandırma Olayının Martenzitik Faz Dönüşümü Üzerine Etkileri, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012
- Akis, A. Ç., Eskill M. ve Sevval E. (2011). Farklı Etkiler Altında Şekil Hafızalı CoNiAl Alaşımının Martenzitik Dönüşüm Sıcaklıklarındaki Değişimler. e- Journal of New World Sciences Academy, 6, 1, 1A0167.
- Alkan, S., and Sehitoglu, H.(2019). Plastic flow resistance of NiTiCu shape memory alloy- theory and experiments. Acta Materialia (163) 173-188.
- Aspinwall, D.K., Soon, S.L., Berrisford, A.E. and Walder, G.(2008). Workpiece surface roughness and integrity after WEDM of Ti-6Al-4V and Inconel 718 using minimum damage generator technology, CIRP Annals- Manufacturing Technology, 57: 187-190
- Ay M., Aydoğdu D. (2010) “ Tel erezyonda kesme parametrelerinin parçanın boyut ölçüsüne etkilerinin deneysel incelenmesi” Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7 (3): 31-44
- Aydoğdu, A (1995). Şekil Hafızalı Cu-Al-Ni Alaşımındaki Martensitik Dönüşümler Üzerinde Termal Yaşlandırma Etkileri. (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Fizik Anabilim Dalı.
- Banerjee S., Prasad B.V.S.S.S. and Mishra P.K. (1993). A simple model to estimate the thermal loads on an edm wire electrode, Journal of Materials Processing Tezhnology, 39: 305-317
- Bayraklı, O. (2012). Identification Of Mechanical Properties Of Graphene-Epoxy Nanocomposites Using Nanoindentation Technique, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Beake, B. D., Endrino, J. L., Kimpton, C., Fox-Rabinovich, G. S., & Veldhuis, S. C. (2017). Elevated temperature repetitive micro-scratch testing of AlCrN, TiAlN and AlTiN PVD coatings. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 69, 215-226.
- Bozali, U., Yaşar M. and Günen A. (2015). Investigation of Mechanical Properties of AISI 4140 Steel Applied to Boriding Procedure. 2nd International Iron and Steel Symposium, 140-144. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:1445015)
- Bu, F., Xue, X., Wang, J., Kou, H., Li, C., Zhang, P., ... & Li, J. (2018). Effect of strong static magnetic field on the microstructure and transformation temperature of Co-Ni-Al ferromagnetic shape memory alloy. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 29(22), 19491-19498.

- Chang, W. S., & Araki, Y. (2016). Use of shape-memory alloys in construction: a critical review. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering (Vol. 169, No. 2, pp. 87-95). ICE Publishing.
- Chatterjee, S., Thakur, M., Giri, S., Majumdar, S., Deb, A. K., & De, S. K. (2008). Transport, magnetic and structural investigations of Co–Ni–Al shape memory alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 456(1-2), 96-100
- Choi, J.Y., and Sia, N.N. (2006). Effect of annealing and initial temperature on mechanical response of a Ni–Ti–Cr shape-memory alloy. *Mater. Sci. EngA*. 432-1, 100-107
- Chumlyakov, Y. I., Kireeva, I. V., Panchenko, E. Y., Timofeeva, E. E., Pobedennaya, Z. V., Chusov, S. V., ... & Kirillov, V. A. (2008). High-temperature superelasticity in CoNiGa, CoNiAl, NiFeGa, and TiNi monocrystals. *Russian Physics Journal*, 51(10), 1016-1036.
- Corneliu, M., Craciunescu, Y. K., Marc D. G., Thomas A. L. and Manfred, W. ( xxx ) Cobalt-base ferromagnetic shape memory alloys, Ames Laboratory Conference Papers, Posters, and Presentations
- Çürük A., (2017). Farklı kaplama teknikleri ile kaplanmış duslu masa rollerinin yüksek sıcaklık aşınma korozyon davranışlarının incelenmesi, Iskenderun Teknik Üniversitesi->Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü->İleri Metalurji ve Malzeme Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı
- David, F., and Bahr, D.J. (2008). Nanoindentation : Localized Probes of Mechanical Behaviours of Materials, Ed. W. Sharpe Jr., Handbook of Experimental Solid Mechanics, 389-408, Springer, NewYork.
- Divya R., Hargovind S., and Narendranath S. (2018). Experimental Investigation and Optimization of WEDM process parameters for Ti50Ni48Co2 Shape Memory Alloy, *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 19063–19072.
- Enami, K. and Nenno, S., (1971). Memory effect in Ni-36.8 At. Pct Al martensite, *Metall. Trans.* 2(5), 1487-1490.
- Eskil, M. (2006) . Fe-Mn-Si Alaşımlarının Mekanik ve Termal Etkiler Altında Şekil Hafıza Özelliklerini İncelenmesi. (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Fizik Anabilim Dalı.
- Eskil, M., Seval, E. and Çetin, A. (2014). Şekil hafızalı conial alaşımlarının kristalografik özellikleri,Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 30(1):19-28
- Fisher, A. C and Cripps, Nano-indentation, vol. 36. 2005.
- Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M. and Altunpak, Y. (2016). Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri, Seçkin yayonevi
- Gerstein, G., Firstov, G. S., Kosorukova, T. A., Koval, Y. N., and Maier, H. J. (2018). Development of B2 Shape Memory Intermetallics Beyond NiAl, CoNiAl and

CoNiGa. Shape Memory and Superelasticity, 1-9.

- Gök, M. S., Küçük, Y., Erdoğan, A., Öge, M., Kanca, E., & Günen, A. (2017). Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 328, 54-62.
- Gökdemir, N. (2006). Şekil Hafızalı Cu-%14,70al-%4,72ni Alaşımında Martensitik Dönüşümün Kristalografik Ve Kinetik Özellikleri. (Yüksek Lisans Tezi) Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Enstitüsü. Fizik Anabilim Dalı
- Gül, K. A.(2010). Nanoindentasyon Deneyi İle Malzeme Davranışlarını İnceleme, Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Simülasyonu ve Tersinir Davranış Tanımlama, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi,
- Gündüz, S. (2012). Metalurjide Faz Diyagramları, Seçkin yayıncılık, ISBN 978-975-02-409-3, Ankara
- Günen, A., Kanca, E., Demir, M., Er, Y., Sağlam, G., & Gök, M. S. (2017). Microabrasion Wear Behavior of Fast-Borided Steel Tooth Drill Bits. *Tribology Transactions*, 60(2), 267-275.
- Günen, A., Ulutan, M., Gok, M. S., Kurt, B., and Orhan, N. (2014). Friction and wear behaviour of borided aisi 304 stainless steel with nano particle and micro particle size of boriding agents. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 20(3), 362-379.
- Hasçalık, A. and Çaydas, U. (2003). Tel erazyon ile islemede kesme parametrelerinin mikroyapı ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 3
- Hasçalık, A. and Çaydaş. U. (2006). CNC Tel Erozyon Tezgâhlarında Farklı Malzemelerin İşlenebilirliğinin Araştırılması, 17(Ekim):41–59.
- Hodgson, D.E. (2002). Shape Memory Applications, Inc., Wu, M.H., Memory Technologies, and Biermann R.J., Harrison Alloys, Inc,
- Işık, A. (2007). FePd Ferromagnetik Şekil Hafızalı Alaşımının Kristalografisi. (Yüksek Lisans Tezi), Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı,
- Choudhary, R., Kumar, H. and Garg, R.K. (2010). Analysis and evaluation of heat affected zones in electric discharge machining of EN-31 die steel. *Indian J Eng Mater Sci* 17:91–98
- Kainuma, R., Ise, M., Jia, C.C., Ohtani, H. and Ishida, K., (1996). Microstructural evolution in ductile (B2)+ $\gamma$  Ni-Al-Fe alloys, *Intermetallics* 4, 37-45.
- Kanca, E., Demir, M., Uğurlu Ö., Günen A., Karakaş M. S. ve Kırar E. (2017). Co Bazlı Şekil Hafızalı Alaşımarda Tel Erozyonla Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Tahmin Edilmesi. *International Advanced Researches*

Engineering Congress-2017, 406-411. (Yayın No:3779233)

- Kayalı, N.(1993). CuZnAl alaşımlarında martensit stabilizasyonu ve yaşlandırma etkileri”, (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Fizik Anabilim Dalı.
- Korshunov, L. G., and Chernenko, N. L. (2014). Effect of severe plastic deformation on the structure, microhardness, and wear resistance of the surface layer of titanium subjected to gas nitriding. *The Physics of Metals and Metallography*, 115(10), 1027-1036.
- Koza J. R. (1992). *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection*, MIT Press, Cambridge
- Kumar, V., Sharma, N., Kumar, K., and Khanna, R. (2018). Surface modification of WC-Co alloy using Al and Si powder through WEDM: A thermal erosion process. *Particulate Science and Technology*, 36(7), 878-886.
- Kurt, B., Günen, A., Kanca, Y., Koç, V., Gök, M. S., Kırar, E., and Askerov, K. (2018). Properties and Tribologic Behavior of Titanium Carbide Coatings on AISI D2 Steel Deposited by Thermoreactive Diffusion. *JOM*, 70(11), 2650-2659.
- Lam, C.W.H., Chung, C.Y., Lung, C.C., Fung, S. and Beling, C.D., (1997). Removal of Martensite Stabilisation in CANTiM Shape Memory Alloy by Postquench Ageing. *Journal Of Materials Processing Tecnology*, 600-603.
- Liu, J. and Li, J.G., (2006). Magnetic Force Microscopy Observations of Co–Ni–Ga and Co–Ni–Al Alloys With Two-Phase Structures. *Scripta Materialia*, 55, 755–758.
- Liu, J. F., Li, L., and Guo., Y. B. (2014). “Surface Integrity Evolution from Main Cut to Finish Trim Cut in W-EDM of Shape Memory Alloy.” *Procedia CIRP* 13:137–42.
- Liu, Z.H., Dai, X.F., Zhu, Z.H. and Chen, J.L. (2004). Martensitic transformation And magnetic properties of Co–Ni–Al shape memory Alloys ribbons. *Scripta Materialia* 37, (2643–2647).
- Machado, P. C., Pereira, J. I., Penagos, J. J., Yonamine, T., and Sinatora, A. (2017). The effect of in-service work hardening and crystallographic orientation on the micro-scratch wear of Hadfield steel. *Wear*, 376, 1064-1073.
- Majumder, H., and Maity, K. (2018). Application of GRNN and multivariate hybrid approach to predict and optimize WEDM responses for Ni-Ti shape memory alloy. *Applied Soft Computing*, 70, 665-679.
- Maziarz W., (2008). Structure Changes of Co–Ni–Al Ferromagnetic Shape Memory Alloys after Vacuum Annealing and Hot Rolling. *Journal of Alloys and Compounds*, 448, 223–226.
- Mihalcz, I. (2001). Fundamental Characteristics And Design Method For Nickel-Titanium Shape Memory Alloy, *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, Vol. 45, No 1, pp.75-86

- Mohapatra, K. D. and Sahoo, S. K.. (2017). Microstructural Analysis of Titanium Alloy Gear Using Wedm Process, *Surface Review and Letters* 1850112:1850112.
- Morito, H., Fujita, A., Fukamichi, K., Kainuma, R. , and Ishida, K. (2002). Magnetocrystalline Anisotropy In Single-Crystal Co–Ni–Al Ferromagnetic Shape-Memory Alloy. *Department Of Materials Science*, 980, (1657-1659).
- Mussada E. K., Hua C. C. and Rao A. K. P. (2018). Surface hardenability studies of the die steel machined by WEDM, *Materials and Manufacturing Processes*, 33:16, 1745-1750
- Muthuramalingam T., Ramamurthy A., Sridharan K. and Ashwin S. (2018). Analysis of surface performance measures on WEDM processed titanium allow with coated electronics. *Materials Research Express*, 5(12), 1-16.
- Nain, S. S., Garg, D., and Kumar, S. (2018). Performance evaluation of the WEDM process of aeronautics super alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 1-16.
- Němeček, J. et al., (2012). *Nanoindentation In Materials Science*
- Nespoli, A., Biffi, C. A., Villa, E., & Tuissi, A. (2017). Effect of heating/cooling rate on martensitic transformation of NiMnGa-Co high temperature ferromagnetic shape memory alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 690, 478-484.
- Pethica, J. B., Hutchings, R., and Oliver, W. C., (1983). "Hardness Measurement at Penetration Depths as Small as 20-Nm", *Philosophical Magazine a-Physics of Condensed Matter Structure Defects and Mechanical Properties*, 48 (4): 593-606.
- Rebecca D. D., Haoxue Y., Ying C. (2016). Grain boundary engineering of Co–Ni–Al, Cu–Zn–Al, and Cu–Al–Ni shape memory alloys by intergranular precipitation of a ductile solid solution phase, *Scripta Materialia* (115) 113–117.
- Roy, A. and Narendranath S. (2018). Impact of Variation in Wire Electro Discharge Machining Responses of Homologous TiNiCu Shape Memory Alloys for Smart Applications: An Experimental Investigation, *Materials Research Express* 5(12):125701.
- Scott D., Boyina S. and Rajurkar K.P. (1991). Analysis and optimization of parameter combination in wire electrical discharge machining, *International Journal of Production Research*, 29 (11): 2189-2207
- Singh M. A., Sarma D. K., Hanzel O., Sedláček J. and Šajgalík P. (2018). Surface characteristics and erosion phenomena in WEDM of alumina composites. *Materials and Manufacturing Processes* 33 (16) 1815-1821
- Soni, H., Narendranath, S., and Ramesh, M. R. (2018). Experimental Investigation on Effects of Wire Electro Discharge Machining of Ti 50 Ni 45 Co 5 Shape Memory Alloys. *Silicon*, 10(6), 2483-2490.



- Tanaka, Y., Oikawa, K., Sutou, Y., Omori, T., Kainuma, R., and Ishida, K. (2006). Martensitic Transition And Superelasticity Of Co–Ni–Al Ferromagnetic Shape Memory Alloys With  $\beta + \gamma$  Two-Phase Structure. *Materials Science And Engineering*, (1054–1060).
- Toptaş, E. and Akkus, N. (2007). Sekil Hafızalı Alasımlar ve Endüstriyel Uygulamaları, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (4) 15-22
- Tosun, N., Cogun, C. and Inan, A. (2019). The effect of cutting parameters on workpiece surface roughness in wire EDM, *Machining Science and Technology V:7, I:2* pp. 209
- Umale, T., Salas, D., Tomes, B., Arroyave, R., & Karaman, I. (2019). The effects of wide range of compositional changes on the martensitic transformation characteristics of NiTiHf shape memory alloys. *Scripta Materialia*, 161, 78-83.
- Wong, M.L. and Leung K.S. (1999). *Data mining using grammar based genetic programming and applications*, London
- Xu G., Yin Z., Luo F., Mou S., Oikawa K. (2006). Martensitic and Magnetic Transformation of Co<sub>41</sub>Ni<sub>32</sub>Al<sub>124</sub>Sb<sub>3</sub> and Co<sub>41</sub>Ni<sub>32</sub>Al<sub>127</sub> Alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 16, 776-782.
- Yanling, W., Jian Y. and Huadong Y. (2018). Superhydrophobic surface prepared by micro-milling and WEDM on aluminum alloy, *Materials Research Express*, 6, 1-8
- Yapıcı, A., Aydın, S.E., Koc, V., Kanca, E. and Yıldız, M. (2019). Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, DOI: 10.1134/S207020511902028X
- Yıldız, K., Kök, M. and Dağdelen, F. (2014). CoNiAlSn Manyetik Şekil Hafızalı Alaşımının Üretilmesi ve Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Fırat Üniv. Fen Bilimleri Dergisi* 26(2), 89-93,
- Yu. I. Chumlyakov, I. V. Kireeva, E. Yu. Panchenko, E. E. Timofeeva, Z. V. Pobedennaya, I. S. V. Chusov, I. Karaman, H. Maier, E. Cesari, And V. A. Kirillov. (2008). High-Temperature Superelasticity In CoNiGa, CoNiAl, NiFeGa, And TiNi Monocrystals. *Russian Physics Journal*. 669, (1016-1036)
- Yurtkuran, E. (2011). T/M İle Üretilmiş Alüminyum Esaslı Malzemelerin Alaşım Elementleri Ve Takviye Elemanı İçermelerine Bağlı Tel Erezyonda İşlenebilirliklerinin Araştırılması Karabük Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
- Yusoff, Y., Mohd Zain, A., Safian, S., Roselina S. and Ngadiman, M. S. (2018). “Potential ANN Prediction Model for Multiperformances WEDM on Inconel 718.” *Neural Computing and Applications* 30(7):2113–27.
- Zhang, P.N and Liu J. (2008). Microstructure and Mechanical Properties in Co–Ni–Ga–Al Shape Memory Alloys With Two-Phase Structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 462, 225–228

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı-adı : UĞURLU Ömer  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 14.09.1981 - İskenderun / HATAY  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : -  
 Faks : -  
 e-mail : [ougurluu@hotmail.com](mailto:ougurluu@hotmail.com)

### Eğitim

Yüksek Lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2019
Lisans	İste Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	2018
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi/Tesisat Öğretmenliği	2006
Lise	İskenderun Endüstri Meslek Lisesi	1998

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019 – Halen	İskenderun GSİM	Memur

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

- ❖ Okçuluk.
- ❖ Masa Tenisi.
- ❖ Yürüyüş Yapmak.

## DİZİN

- A**  
akıllı malzemeler · 1  
akım · 2, 14, 15, 16, 39  
Akım · 15, 23, 30, 39,  
40, 47  
alaşım · 4, 17, 18, 24, 25  
Amper · 15  
ANOVA · 24  
arc-melter · 21  
aşınma · 2, 15, 26, 35, 36,  
58, 59, 60, 61, 62, 63,  
64, 65, 66, 67  
aşınma izi · 62  
Atık · 16  
Au-Cd · 7, 18
- B**  
batma derinliği · 33  
Berkovich · 34, 35  
Beyaz tabaka · 50, 54  
bilyeli · 12
- C**  
çapak · 17  
çaprazlama · 31  
çarpılma · 17  
Çekirdeklenme · 4  
çekme dayanımı · 33  
çift yönlü · 1, 3, 20  
çökmesi hızlı · 9  
CoNiAl · 1, 2, 9, 10, 11,  
18, 19, 27, 37, 38, 44,  
45, 46, 50, 52, 55, 66,  
67, 68, 69, 70, 73  
Curie · 1, 9, 10, 19, 21,  
27
- D**  
demir esaslı · 2, 3  
Deneme sayısı · 41  
Dielektrik · 12, 16  
difüzyonsuz · 3, 4, 5  
dişli · 14  
dönüşüm sıcaklıkları ·  
10, 22, 45  
DSC · 20, 21, 27, 38, 66
- E**  
EDM · 11, 71, 73  
elastisite modülü · 33, 34
- elektrot · 12, 15, 16, 22,  
23, 24  
enerji yoğunluğu · 14
- F**  
faz2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,  
10, 19, 20, 21, 22, 25,  
27, 38, 45, 66  
ferromanyetik · 1, 19, 20  
finiş işlemi · 17  
fiziksel temas · 11  
Fonksiyon seti · 41  
fonksiyonel · 1  
frekans · 24
- G**  
Gen sayısı · 41  
Genetik programlama  
· 31, 40  
GEP · 31, 40, 41, 42, 43,  
66
- H**  
HCI · 32, 44
- I**  
ICP27, 37  
ikizlenme · 3, 6  
İndirgenmiş Elastisite ·  
34  
InTi · 7  
ısıtma işlemi · 1, 3, 20, 37  
izotermal · 4
- K**  
kalıp · 14, 16, 24, 25  
kanatçık · 14  
karbür · 17  
kesme kuvveti · 11  
kırılgan · 17  
kıvılcımların · 12  
kompozit · 4  
Konvansiyonel · 11  
kraterler · 14  
kristalografik · 1, 3, 5,  
22, 27, 69  
Kromozomlar · 41
- M**  
makro · 14  
Martensit bitiş · 6  
Martenzit başlama · 6
- martenzitik · 3, 4, 5, 6, 7,  
8, 9, 10, 11, 18, 19,  
20, 21, 22, 38, 45, 66  
matematiksel model · 31  
mekanizmaların · 12  
mikro · 2, 7, 10, 14, 19,  
21, 24, 25, 32, 34, 44,  
45, 46, 47, 50, 65, 67  
modern imalat · 11, 12  
monoklinik · 20  
Mutasyon · 31, 41
- N**  
nano intendasyon · 32  
nano sertlik · 35, 50  
Ni-Al-Fe · 18, 70  
NiFeGa · 1, 9, 69, 73  
NiMnGa · 1, 9, 72  
NiTi · 2, 7, 18  
NiTi alaşımları · 2, 18
- O**  
ölçü doğruluğu · 23  
optik mikroskop · 44  
ortalama karekök · 52,  
53, 55, 56  
ortorombik · 20  
östenit · 3, 5, 6, 7, 8, 10,  
11, 21, 22, 38, 66
- P**  
paramagnetik · 10  
partlatma · 32  
Piezoelektrik · 1  
pile-up · 52, 53, 55, 56  
piramid uç · 49  
pirinç · 12, 29  
plastik deformasyona · 3,  
62, 65  
plastisite · 3  
puls süresi · ii, 2, 23, 24,  
25
- R**  
Ra · 31, 40, 52, 53, 55,  
56, 66  
rastlantısal · 31  
Rz · 31

---

**S**

Scanning Probe

Microscopy · 35

Şekil hafızalı · 1

Şekil hafızalı alaşımlar

·3, 10

SEM ·32, 36, 62, 63, 64,  
65

seramik · 27, 66

sert · 10, 12, 17, 22, 24,  
47, 50, 59, 62, 65

sıvı basıncı · 16

SPM ·28, 29, 35, 50, 52,  
53, 55, 56, 57

süper alaşımlar · 4

---

**T**

Tabla · 16, 28, 29

tahribatlı muayeneler ·  
32

takım · 12

Talaş kaldırma · 12

tek yönlü · 1, 3

tekrarlı yükler · 62

tel erozyon · ii, 2, 11, 12,  
22, 23, 25, 34, 35, 50,  
58, 59, 62, 66, 67

Tel gerginliği · 16, 29

tel hızı · 23

termal yaşlandırma · 19

termo reaktif difüzyon ·  
62

termodinamik · 2

termoelastik · 3, 5, 8, 9,  
10, 11, 18, 19, 20

termo-elastik · 5

termo-elastik · 6

termo-elastik · 7

tetragonal ·10

tungsten · 12

---

**V**

Vickers sertlik · 21

voltaj · ii, 2, 15, 16, 25,  
40

vurum · 14, 15, 40

---

**X**

XRD · 19, 21, 25, 27, 37,  
38, 50, 66

---

**Y**

yeniden kristalleşen · 15,  
24, 59, 62, 65, 66

yüzey profilometresi · 35

yüzey pürüzlülüğü · 2,  
23, 25, 39, 62

---

**Z**

zımba · 14



**TEKNOVERSITE**





**teknoversite** AYRICALIĞINDASINIZ

**İSTE**

