



**NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL HAFIZALI
ALAŞIMLARIN ELEKTRO EROZYON
TEZGAHINDA İŞLENEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Metehan YILMAZ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA**

**NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN ELEKTRO
EROZYON TEZGAHINDA İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Metehan YILMAZ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2023**

Metehan YILMAZ tarafından hazırlanan “NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN ELEKTRO EROZYON TEZGAHINDA İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 24/01/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Gökhan SUR (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Engin NAS (DÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Metehan YILMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN ELEKTRO EROZYON TEZGAHINDA İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Metehan YILMAZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Ocak 2023, 84 sayfa

Bu çalışmada, Nikel-Titanyum şekil hafızalı alaşımların Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) (Electrical Discharge Machining, EDM) tezgahında işlenebilirliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar üç farklı elektrot (bakır, grafit, tungsten-bakır) ile dielektrik sıvı (dielektriküm 358) ortamında gerçekleştirilmiştir. Deney parametre değerleri üç farklı akım (6, 12, 18 A), vurum süresi (200, 400, 600 μ s) ile sabit voltaj (3 V) ve vurum ara süresi (50 μ s) olarak belirlenmiştir. Ele alınan bu parametre değerleri ile gerçekleştirilen deneylerden talaş kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük değeri bakımından en uygun kesme şartlarının tayin edilmesi amaçlanmıştır. Talaş kaldırma işlemleri sonrası deney numuneleri ve elektrot çaplarının ölçümü Dino-Lite Digital mikroskop kullanımıyla gerçekleştirilerek mukayese edilmiştir. Elektrot çapları ile delik çaplarının mukayesesi yapılmıştır. Ayrıca belirlenen deney parametrelerinin deney numune yüzeyinde meydana gelen etkileri taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electro Microscopy, SEM)

yardımıyla görüntülenerek incelenmiştir. Talaş kaldırma işlemi sırasında elektrot malzemesinde gerçekleşen kopmaların hangi oranda numune yüzeyine yapıştığını tespit etmek amacıyla enerji dağılımlı spektroskopi (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX) yardımıyla analiz gerçekleştirilmiştir. Deney parametrelerinin değişken faktörler üzerindeki etki derecelerini belirlemek için varyans (ANOVA) analizi uygulanmıştır. Faktörlerin etki derecelerini belirlemek ve etki derecelerinin sıralamasını tayin etmek için Minitab 18 paket programı kullanılmıştır. En yüksek talaş kaldırma oranı grafit elektrot ile 18 A, 200 µs vurum süresi değerlerinde (0,0532 gr/dk) elde edilmiştir. En düşük ortalama yüzey pürüzlülük oranı bakır elektrot ile 6 A, 200 µs vurum süresi değerlerinde (2,6742 µm) elde edilmiştir. En küçük delik çap oranı grafit elektrot ile 12 A, 200 µs vurum süresi değerlerinde (12,77 mm) elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Akıllı malzeme, şekil hafızalı alaşım, elektro erozyon işleme, ortalama yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı.

Bilim Kodu : 91421

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE MACHINABILITY OF NICKEL-TITANIUM SHAPE MEMORY ALLOYS ON ELECTRO DISCHARGE MACHINE

Metehan YILMAZ

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

January 2023, 84 pages

In this study, the machinability of Nickel-Titanium (NiTi) shape memory alloys on the Electrical Discharge Machining (EDM) machine was investigated. Experimental studies were carried out in the environment of three different electrodes (copper, graphite, tungsten-copper) and dielectric liquid (dielectricum 358). Experimental parameter values were determined as three different currents (6, 12, 18 A), pulse duration (200, 400, 600 μ s) and constant voltage (3 V) and pulse interval time (50 μ s). It is aimed to determine the most suitable cutting conditions in terms of metal removal rate and average surface roughness value from the experiments carried out with these parameter values. After chip removal, test samples and electrode diameters were measured using Dino-Lite Digital microscope and compared. The comparison of the electrode diameters with the hole diameters was made. In addition, the effects of the determined test parameters on the test sample surface were examined with the help of scanning electron microscope (Scanning Electro

Microscopy, SEM). Analysis was carried out with the help of energy dispersive spectroscopy (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX) in order to determine the extent to which the breaks in the electrode material adhered to the sample surface during the machining process. Analysis of variance (ANOVA) was applied to determine the degree of influence of experimental parameters on variable factors. Minitab 18 package program was used to determine the effect degrees of the factors and to determine the order of the effect degrees. The highest metal removal rate is 18 A with graphite electrode it was obtained at the pulse duration values of 200 μ s (0,0532 gr/min). The lowest average surface roughness ratio was obtained with the copper electrode at 6 A, 200 μ s pulse time values (2.6742 μ m). The smallest hole diameter ratio was obtained with the graphite electrode at 12 A, 200 μ s pulse time values (12.77 mm).

Key Word : Smart material, shape memory alloy, electrical discharge machining average surface roughness, material removal rate.

Science Code : 91421

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında sabrını ilgi ve bilgisini esirgemeyen kendisi ile çalışmaktan her daim onur duyduğum ve duyacağım değerli hocam ve tez danışmanım sayın Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı KBÜBAP-21-YL-073 numaralı proje kapsamında finansal olarak destekleyen Karabük Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Yönetim Koordinatörlüğü çalışanlarına, çalışmam esnasında beni yönlendiren sayın Doç. Dr. Gökhan SUR, Doç. Dr. Engin NAS ve makine teçhizat kullanımında Düzce Üniversitesi Dr. Engin PAK Cumayeri Meslek Yüksekokulu'na teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni her konuda motive eden, tüm sıkıntıları ve mutlulukları benimle paylaşan canım aileme ve lisansüstü eğitimim süresince gerekli prosedürler hakkında beni bilgilendiren, maddi ve manevi destek olan değerli arkadaşım Öğr. Gör. Sedat GÜVEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni her konuda destekleyen, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen maddi manevi her daim yanımda olan ve olacağına inandığım Kıvanç GÖKKAYA'ya, Dr. Öğr. Üyesi Samet GÖKKAYA'ya teşekkür ederim.

Son olarak teşekkürlerin en büyüğünü abim Kaan YILMAZ'a ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ixv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
AKILLI MALZEMELER	4
2.1. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR.....	5
2.1.1. Şekil Hafıza Etkisi	7
2.1.1.1. Tek Yönlü Şekil Hafıza Etkisi	9
2.1.1.2. Çift Yönlü Şekil Hafıza Etkisi	10
2.2. SÜPERELASTİK DAVRANIŞ	11
2.3. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER.....	11
2.3.1. Piezoelektrik Seramikler.....	12
2.3.2. Piezoelektrik Polimerler	12
2.3.3. Piezoelektrik Kristaller	13
2.4. ŞEKİL HAFIZALI POLİMERLER	13
2.5. MAGNETOSTRİKTİF MALZEMELER	14
2.6. AKILLI MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI	14
2.6.1. Şekil Hafızalı Alaşımların Uygulama Alanları.....	14

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3	17
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
3.1. NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN ELEKTRO EROZYON TEZGAHINDA İŞLENMESİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	17
3.2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ	40
BÖLÜM 4	41
MATERYAL VE METOD	41
4.1. ELEKTRO EROZYON TEZGAHI	41
4.2. DENEY NUMUNESİ	42
4.3. İŞLEME PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ VE ÖN DENEYLERİN YAPILMASI	43
4.4. İŞLENEBİLİRLİK DENEYLERİ.....	44
4.4.1. Elektrot Seçimi	44
4.5. DENEY PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	44
4.5.1. Taguchi Deneysel Tasarımı Yaklaşımı.....	45
4.6. TALAŞ KALDIRMA ORANI.....	45
4.7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ.....	46
4.8. DELİK ÇAP ÖLÇÜMÜ	47
4.9. MİKRO YAPI GÖRÜNTÜLERİ.....	47
4.10. ENERJİ DAĞILIMLI SPEKTROMETRE	48
4.11.VARYANS (ANOVA) ANALİZİ	48
BÖLÜM 5	49
BULGULAR VE TARTIŞMA	49
5.1. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU İLE MİKRO YAPI İNCELEMELERİ.....	49

	<u>Sayfa</u>
5.2. ENERJİ DAĞILIM SPEKTROSKOPİSİ KULLANILARAK ELEMENT TANIMLAMA ANALİZİ.....	54
5.3. DELİK ÇAP ÖLÇÜMÜ.....	67
5.4. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)	70
5.4.1. Talaş Kaldırma Oranı ANOVA Verileri.....	70
5.4.2. Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değerleri ANOVA Verileri	72
BÖLÜM 6	75
SONUÇLAR.....	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	a) Kayma ve b) İkizlenme gösterimi.....	6
Şekil 2.2.	ŞHA'larda martenzitik faz dönüşümü	7
Şekil 2.3.	Şekil hafıza özelliği mekanizması	8
Şekil 2.4.	ŞHA'larda gerilme, gerinme ve sıcaklık değerlerine göre faz yapıları, dönüşümler ve kristal yapılar.....	8
Şekil 2.5.	ŞHA'larda tek yönlü ŞHE.....	9
Şekil 2.6.	ŞHA'larda tek yönlü ŞHE faz dönüşümü sonrasında artık gerinmelerin kaldırılması	10
Şekil 2.7.	ŞHA'larda çift yönlü ŞHE.	10
Şekil 2.8.	ŞHA'ların süpereslatik davranışı	11
Şekil 2.9.	ŞHA'ların çeşitli kullanım alanları.	15
Şekil 2.10.	Diş teli uygulamalarında ŞHA'ların uygulama örnekleri.....	16
Şekil 2.11.	ŞHA'ların kalp ve damar tıkanıklığında kullanılan stent uygulaması..	16
Şekil 3.1.	Deney parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkileri..	18
Şekil 3.2.	Farklı akım ve vurum sürelerine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.	20
Şekil 3.3.	Farklı işleme parametre değerlerinde elde edilen takım aşınma ve boyutsal sapma oranları değerleri	24
Şekil 3.4.	Akım değerinin talaş kaldırma ve takım aşınma oranı üzerindeki etkisi.	25
Şekil 3.5.	Deney parametrelerinin talaş kaldırma oranına ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine etkisi	27
Şekil 3.6.	İşlenmiş NiTi'de TiC çökelmelerinin SEM görüntüleri	29
Şekil 3.7.	Kriyojenik işlem uygulanmış/uygulanmamış NiTi ŞHA'ların a) akım, b) vurum süresi, c) vurum ara süresi parametre değerlerinin talaş kaldırma ve elektrot aşınma oranına etkileri.....	31
Şekil 3.8.	Deney numunelerin SEM görüntüsü ve XRD sonuçları.....	33
Şekil 3.9.	Yüzeyi kaplanmış NiTi alaşımının kimyasal kompozisyon verileri.....	34
Şekil 3.10.	Optimize edilmiş parametrelerde tel erozyon ile işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü	35
Şekil 3.11.	Toz karışımlı EEİ ile işlemenin deneysel kurulumuna ait şematik görünüm	37

Şekil 3.12.	Voltaj, akım, vurum süresi ve vurum ara süresi değerlerinin talaş kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine etkisi.....	39
Şekil 4.1.	EEİ-KING ZNC K-3200 Elektro Erozyon Tezgağı fotoğraf görüntüsü	42
Şekil 4.2.	NiTi ŞHA deney numunesi teknik resim görüntüsü.....	42
Şekil 4.3.	NiTi ŞHA'ların EEİ ile işlenmesinde kullanılan elektrotların (E ₁ , E ₂ , E ₃) fotoğraf görüntüsü	44
Şekil 4.4.	Precisa LS 320A SCS Analitik terazi cihazı fotoğraf görüntüsü.....	46
Şekil 4.5.	MAHR-MarSURF PS 10 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı fotoğraf görüntüsü	46
Şekil 4.6.	Mikroskop ile delik çapı ölçümünün genel görüntüsü.....	47
Şekil 4.7.	Delik çap ölçümü gösterimi.....	47
Şekil 4.8.	Carl Zeiss Ultra Gemini Fesem marka SEM cihazı genel görüntüsü... ..	48
Şekil 5.1.	NiTi ŞHA'ların; E ₁ elektrot kullanılarak (a) en düşük R _a ve (b) en yüksek R _a , E ₂ elektrot kullanılarak (c) en düşük R _a ve (d) en yüksek R _a ve E ₃ elektrot kullanılarak (e) en düşük R _a ve (f) en yüksek R _a oluşumlarına ait 250x büyütme SEM görüntüleri	50
Şekil 5.2.	NiTi ŞHA numunesinin E ₁ elektrot, 200 µs vurum süresi, (a) akım 6 A ve ve (b) akım 12 A değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 250x büyütme SEM görüntüleri.....	51
Şekil 5.3.	NiTi ŞHA numunesinin E ₂ elektrot, 200 µs vurum süresi, (c) akım 6 A ve ve (d) akım 12 A değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 250x büyütme SEM görüntüleri.....	52
Şekil 5.4.	NiTi ŞHA numunesinin E ₃ elektrot, 200 µs vurum süresi, (e) akım 6 A ve ve (f) akım 12 A değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 250x büyütme SEM görüntüleri.....	53
Şekil 5.5.	NiTi ŞHA numunesinin E ₁ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü	55
Şekil 5.6.	NiTi ŞHA numunesinin E ₁ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları	56
Şekil 5.7.	NiTi ŞHA numunesinin E ₁ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü	57
Şekil 5.8.	NiTi ŞHA numunesinin E ₁ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları	58
Şekil 5.9.	NiTi ŞHA numunesinin E ₂ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü	59

Şekil 5.10.	NiTi ŞHA numunesinin E ₂ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları	60
Şekil 5.11.	NiTi ŞHA numunesinin E ₂ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü	61
Şekil 5.12.	NiTi ŞHA numunesinin E ₂ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları	62
Şekil 5.13.	NiTi ŞHA numunesinin E ₃ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü	63
Şekil 5.14.	NiTi ŞHA numunesinin E ₃ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları	64
Şekil 5.15.	NiTi ŞHA numunesinin E ₃ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü	65
Şekil 5.16.	NiTi ŞHA numunesinin E ₃ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları	66
Şekil 5.17.	E ₁ , E ₂ ve E ₃ elektrot ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda en büyük ve en küçük delik çapının olduğu numunelerin mikroskopik (Dino-Lite Digital) görüntüleri	69
Şekil 5.18.	Talaş kaldırma oranı için sinyal gürültü grafiği	72
Şekil 5.19.	Ortalama yüzey pürüzlülüğü oranı için sinyal gürültü grafiği	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Bazı ŞHA'ların bileşimi, martenzitik dönüşüm sıcaklıkları ve sıcaklık histerezisleri.....	6
Çizelge 3.1. Gri ilişki analizi ile elde edilen deney parametrelerinin etki düzeyleri	18
Çizelge 3.2. Farklı deney parametrelerinde elde edilen talaş kaldırma oranı ve takım aşınma oranı değerleri.....	19
Çizelge 3.3. Farklı işleme parametrelerinde elde edilen talaş kaldırma oranı değerleri	22
Çizelge 3.4. İşleme parametreleri	26
Çizelge 3.5. Deney numunelerinin termal iletkenlik değerleri	26
Çizelge 3.6. İşlem parametreleri	27
Çizelge 4.1. NiTi ŞHA malzemesinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça).....	43
Çizelge 4.2. NiTi ŞHA'nın termal ve elastik özellikleri.....	43
Çizelge 4.3. NiTi ŞHA'nın mekanik özellikleri	43
Çizelge 4.4. Talaş kaldırma işlemlerinde kullanılan parametre değerleri.....	43
Çizelge 4.5. Deney parametreleri.....	43
Çizelge 5.1. NiTi ŞHA numunelerin çeşitli işleme parametrelerinde işlenmeleri sonrası elde edilen delik çap ölçüleri	68
Çizelge 5.2. Talaş kaldırma oranı deney verileri	70
Çizelge 5.3. NiTi ŞHA deney numunesinin talaş kaldırma oranı bağlı varyans analizi sonuçları.....	71
Çizelge 5.4. Talaş kaldırma işlem sonrası ortalama yüzey pürüzlülük verileri	72
Çizelge 5.5. NiTi ŞHA deney numunesinin ortalama yüzey pürüzlülük oranına bağlı varyans analizi sonuçları.....	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- A : östenit yapı
A_s : östenit faz başlangıç
AuCd: altın kadmiyum
cm² : santimetrekare
Cu : bakır
J/g.°C: ısı kapasitesi
M : martenzit yapı
M_f : martenzit faz bitiş
M_s : martenzit faz başlangıç
Ni : nikel
R_a : ortalama yüzey pürüzlülüğü
Ti : titanyum
° : derece
°C : santigrat derece
µm : mikrometre
µs : mikrosaniye

KISALTMALAR

ŞHA	: Şekil Hafızalı Alaşım
ŞHP	: Şekil Hafızalı Polimer
ŞHE	: Şekil Hafıza Etkisi
SE	: Superelasticity (süper elastisite)
SEM	: Scanning Electron Microscope (taramalı elektron mikroskobu)
XRD	: X-Ray Diffractometer (x-ışını difraktometresi)
EDX	: Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (enerji dağılımlı spektroskopi)
EDM	: Electric Discharge Machining (elektro erozyon ile işleme)
EEİ	: Elektro Erozyon ile İşleme
TM	: Twinned Martensite (ikizlenmiş martenzitik yapı)
DM	: Deformed Martensite (deformasyona uğramış ikizlenmiş martenzit)
PVDF	: Polivilidin Florür
TiNiCr	: Titanyum-Nikel-Krom
TiNiZr	: Titanyum-Nikel-Zirkonyum
NiTiCO ₂	: Nikel-Titanyum-Karbondioksit
CuO ₂	: Bakır Oksit
CrMoV	: Krom-Molibden-Vanadyum
WCu	: Tungsten Bakır
TiO ₂	: Titanyum Oksit

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak ileri malzemelere (ileri fonksiyonel malzemeler) olan ihtiyaç günden güne önem kazanmaktadır. Bu alanın en önemli temsilcilerinden olan akıllı malzemelerin kullanım alanları oldukça fazladır. Dışarıdan bir etkiyle (ışık, kuvvet, ısı, nem) yapılarında değişimler meydana gelen akıllı malzemeler, yüksek teknolojik gelişmelere bağlı olarak bilim insanlarına yeni fikirler kazandırmaktadır. Dış etkiyle burulan, büzüşen, genişleyen ya da daralan akıllı malzemeler üzerine son yıllarda oldukça fazla araştırmalar yapılmaktadır [1].

Çeşitli yüksek teknoloji uygulamalarda kullanılabilen, diğer malzeme gruplarına kıyasla belirli ve farklı özellikler sergileyen birçok akıllı malzeme bulunmaktadır. Bunlar Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA), Şekil Hafızalı Polimerler (ŞHP), piezoelektrik ve magnetostriktif malzemeler olarak adlandırılmaktadır.

ŞHA'lar, mekanik ve uygun ısı işlemlere maruz bırakıldığında, önceden yüklenilmiş şekil veya boyutunu geri kazanan malzemelerdir [2, 3]. ŞHA malzemeleri kendi içerisinde Şekil Hafıza Etkisi (ŞHE) ve Süper Elastisite (SE) olmak üzere iki farklı davranış (özellik) sergilemektedir [2, 4]. Otomotiv, havacılık ve uzay sektörü ile tıp alanında sıkça kullanılmakta, bununla birlikte inşaat ve tekstil gibi sektörlerde de son yıllarda kullanımları artmaktadır [2].

ŞHP'ler, çevresel (dış) uyarıların etkisiyle özelliklerinde belirgin farklılıklar gösterebilen akıllı malzemelerdir. Son zamanlarda, akıllı tekstiller grubunda yer alan ŞHP'ler ile ilgili çalışmalar, çoğunlukla sıcaklık ve su/nem duyarlılığı ile alakalıdır.

ŞHP'lerin tekstil uygulamalarında kullanılan lif çekimi, iplik ve kumaş oluşumu, film, kaplama gibi çalışmaları bulunmaktadır [5].

Piezoelektrik özellik, mekanik bir enerjiyi elektriğe ya da tam tersi olan elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirebilmektedir. Piezoelektrik özelliği, bazı malzemelere (belirli kristaller; kemik gibi) uygulanan mekanik basınç neticesinde, malzemenin elektrik alan ya da potansiyel değiştirme yeteneğidir [6].

Magnetostriktif malzemeler, manyetik alan tesiri altında tepki vermektedir. Bu tepki manyetik alan ile birlikte malzemenin iç yapısında elektronların yeniden şekillenmesi neticesinde gerçekleşir. Kısacası magnetostriktif malzemenin etrafına sarılan bobinden elektrik akımı geçirilerek oluşturulan manyetik alanın istenilen uzamayı vermesi şeklindedir. Günümüzde halen birçok farklı alışımdan magnetostriktif malzemeler geliştirilmeye çalışılmaktadır [7].

ŞHA'lar ticari alanda fazlasıyla kullanılan akıllı malzemelerdir. Şekil hafıza özellikleri, yüksek korozyon direnci ve biyouyumluluk gibi eşsiz özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Üstün mekanik ve fiziksel özellikler sebebiyle işlenebilirlikleri oldukça zor olan ŞHA'lar, yüksek takım aşınması ve düşük yüzey kalitesi nedeniyle geleneksel (alışılmış) yöntemler kullanılarak işlenmeleri oldukça zordur. Bu sebeple, NiTi ŞHA'ların işlenmesinde (talaş kaldırma işlemleri) geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Elektro erozyon ile İşleme (EEİ) yöntemi NiTi ŞHA'ların işlenmesinde yaygın olarak kullanılan alışılmamış (geleneksel olmayan) imalat yöntemlerindedir. Sert, kırılğan ve kompleks (karmaşık) yapıya sahip malzemeleri şekillendirmek için kullanılan bu yöntemde işleme parametrelerinin doğru tatbik edilmemesi ile birlikte yüksek takım aşınması, düşük yüzey kalitesi gibi istenilmeyen durumlar meydana gelebilmektedir. Bu durum NiTi ŞHA'ların ŞHE ve SE davranışlarını olumsuz etkilemekte ve aynı zamanda korozyon direnci dayanımını düşüren, yorulma ömrünü azaltan problemleri de beraberinde getirmektedir [8]. Bu çalışmada NiTi ŞHA'ların dalma erozyon yöntemiyle işlenmesinde işlenebilirliği araştırılmıştır. Üç farklı akım (6, 12, 18 A), vuruş süresi (200, 400, 600 µs), ve sabit voltaj (3 V) ile vuruş ara süresi (50 µs) işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranı, ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine

etkileri incelenmiştir. Ayrıca ŞHA numunelerinin talaş kaldırma deneyleri sonrasında delik çaplarının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırma işlemi esnasında elektrotta meydana gelen aşınmaların delik çaplarında herhangi bir kusur (çatlak) meydana gelip gelmediği gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 2

AKILLI MALZEMELER

Akıllı malzemeler, dış çevre şartlarına uyum sağlama özelliğine sahip yeteneklerini ve özelliklerini dış uyaranlarına karşı değiştirebilen, çevrelerine en uygun şekilde uyum sağlayan malzemelerdir [1, 9]. Akıllı malzemelerin özellik değişimlerinde kullanılan uyaranlar; kimyasal (pH ve nem vb.), fiziksel (ışık, manyetik alan, sıcaklık vb.) veya biyolojik olabilmektedir [1, 10].

Akıllı malzemelerin kullanım alanları geniş bir yer tutmaktadır. Havacılık, otomotiv, ve uzay endüstrisi, sağlık/tıp, inşaat sektörü ve robot teknolojileri gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ve ihtiyaçların gün geçtikçe artmasıyla birlikte kullanımları giderek artmaktadır. Akıllı malzemeler; ŞHA, ŞHP, piezoelektrik ve magnetostriktif malzemeler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Akıllı malzemeler, aktif, pasif ve çok akıllı olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır [11-13].

Aktif akıllı malzemeler, termal, elektrik veya manyetik alanların uygulanması sonrasında meydana gelen geometrik şekil veya malzeme özelliklerini değiştirebilme özelliğine sahip olan malzemeler olarak bilinmektedir [14].

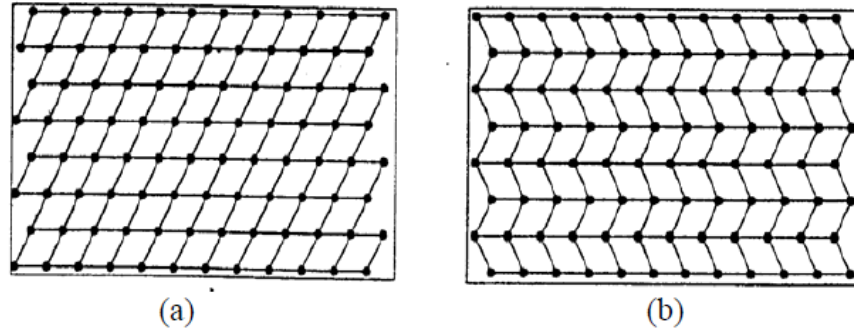
Enerji üretmek için dahili kapasiteye sahip olmayan akıllı malzemeler pasif akıllı malzemeler olarak isimlendirilmektedir [15]. Pasif akıllı malzemeler, sadece aldıkları etkiye bağlı olarak tepki vermekte ve çevresel uyarıcılara karşı sensör (algılayıcı) fonksiyonuna sahiptir [1, 16]. Çok akıllı malzemeler, tepki verme, uyarlanabilme ve algılama yeteneğine (özelliğine) sahiptir [17]. Akıllı malzemelerin “akıllı” olarak adlandırılabilmesi için gerekli olan bazı özellikleri üzerinde bulundurması (tersinirlik, enerji dönüşümü) gerekmektedir [1, 18].

2.1. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

ŞHA uygulanan sıcaklık ve gerilmelere bağlı olarak önceki şekil veya boyutuna geri dönebilme özelliğine sahip metalik malzemelerdir [1, 19]. ŞHA'ların temel karakteristikleri, kritik bir dönüşüm sıcaklığının altında ve üzerinde iki farklı şekil ve kristal yapıya sahip olmalarıdır. Kritik sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda östenik yapı (A), altındaki sıcaklıklarda martenzit (M) yapı elde edilir [1, 19]. Yüksek sıcaklıklarda yani ana faz (östenik) yapıda kristal kafes yapısı yüksek simetriye sahip iken (kübik), düşük simetriye sahip martenzit fazı tetragonal, monoklinik kristal yapılarına sahiptir [20, 21].

ŞHA'lar ilk olarak 1932 tarihinde İsveç'li Arne Ölander tarafından Altın-Kadmiyum (AuCd) alaşımı üzerinde keşfedilmiştir. 1941 tarihinde Vernon tarafından "şekil hafıza" terimi tanımlanmıştır. 1960'lı yılların başında William Buehler ve Frederick Wang tarafından tesadüfi bir şekilde bulunan Nikel-Titanyum (NiTi) ŞHA'lar bilim insanların dikkatini çekmiştir. NiTi ŞHA'ların Şekil Hafıza Etkisi (ŞHE), Süper Elastisite (SE) ve mükemmel biyouyumluluk gibi eşsiz özelliklere sahip olduğunun anlaşılması ile birlikte havacılık, uzay, otomotiv, tıp ve biyomedikal alanlarında sürekli artan bir gelişme görülmüştür [21].

ŞHA'larda, yüksek sıcaklıktaki ana fazın uzun süren dönüşümü sonucunda termoelastik martenzit faz dönüşümü görülmektedir [1]. Martenzitik dönüşüm, difüzyonsuz katı hal faz dönüşümüdür. Termoelastik ve termoelastik olmayan martenzitik faz dönüşümü olarak iki gruba ayrılabilir. Termoelastik martenzitik faz dönüşümü, "ikizlenme" ile meydana gelen ve kristalografik olarak geri dönüşüm gösterebilen bir mekanizmadır. Termoelastik olmayan martenzitik faz dönüşümü "kayma" mekanizması (Şekil 2.1) ile birlikte oluşmakta ve martenzitik yapının önceki haline geri dönmesi imkansız hale gelmektedir. ŞHA'ların ikizlenme mekanizmasının gösterimi Şekil 2.1'de gösterilmektedir. [22, 23].

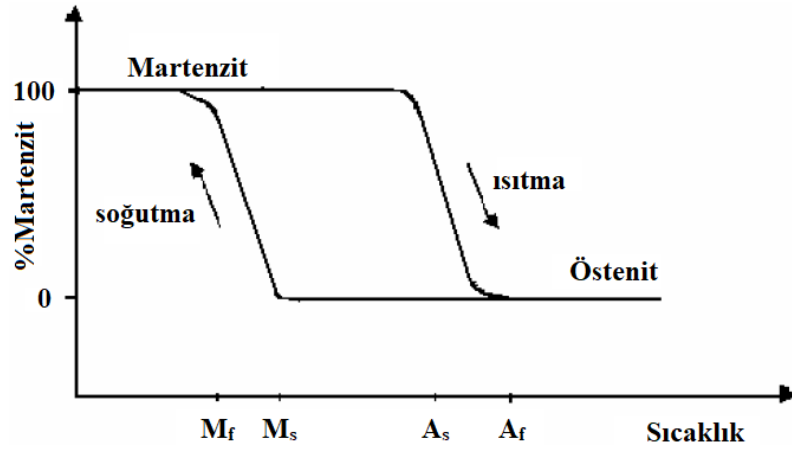


Şekil 2.1. a) Kayma ve b) İkizlenme gösterimi [23].

Martenzit fazdan (düşük sıcaklık) östenit faza (yüksek sıcaklık) geçiş ve östenit fazdan martenzit faza geçiş bir histerezis (dönüşüm sıcaklığı) gösterecek şekilde farklı sıcaklıklarda meydana gelmektedir. Her alaşımın gösterdiği histerezis farklıdır. Çizelge 2.1’de bazı ŞHA’ların bileşimi, dönüşüm sıcaklıkları ve sıcaklık histerizisleri verilmiştir [23, 24]. Histerezis üzerinde sıcaklık değerinin düşmesi ile martenzit faz başlangıç (M_s), tamamen martenzitik faz dönüşümün meydana gelmesi (M_f), sıcaklık değeri arttırıldığında ise östenitik faz yapının başlangıcı (A_s) ve tamamen östenitik faz yapının elde edilmesi (A_f) ile gösterilmektedir (Şekil 2.2) [23].

Çizelge 2.1. Bazı ŞHA’ların bileşimi, martenzitik dönüşüm sıcaklıkları ve sıcaklık histerezisleri [23, 24].

Alaşım	Bileşim oranı	Martenzitik dönüşüm sıcaklığı M_s (°C)	Histerezis
AgCd	%44/49 Cd (at.)	-190 ile -50 arası	~15
AuCd	%46.5/50 Cd (at.)	30 ile 100 arası	~15
BAKIR ESASLI			
CuZn	%38.5/41.5 Zn (ağ.)	-180 ile -10 arası	~10
CuAuZn	%23~28 Au, %45~47 Zn (at)	-140 ile 100 arası	~35
CuAlNi	%14 Al, %3.5 Ni (ağ.)	-150 ile 200 arası	~35
CuSn	~%15 Sn (at.)	-120 ile 30 arası	~10
CuMn	%5/35 Cu (at.)	-250 ile 180 arası	~25
NİKEL ESASLI			
NiTi	%49-51 Ni (at.)	-50 ile 100 arası	~30
NiAl	%36-38 Al (at.)	-180 ile 100 arası	~10
DEMİR ESASLI			
FeMnSi	%32 Mn, %6 Si	-200 ile 150 arası	~100
FePt	%25 Pt (at.)	~ -130	~4
FePd	%30 Pd (at.)	~ -100	



Şekil 2.2. ŞHA’larda martenzitik faz dönüşümü [23].

ŞHA’lar, ŞHE ve SE özellikleri nedeniyle metal ve alaşımlardan farklı niteliklere sahiptir [1, 25]. ŞHE ve SE, ana faz yapısı ile iki düşük sıcaklık fazı (ikizlenmiş martenzitik (TM) ya da deformasyona uğraşmış ikizlenmiş martenzit (DM) yapı) arasında, termoelastik martenzitik faz dönüşümü ile açıklanabilmektedir [1, 26].

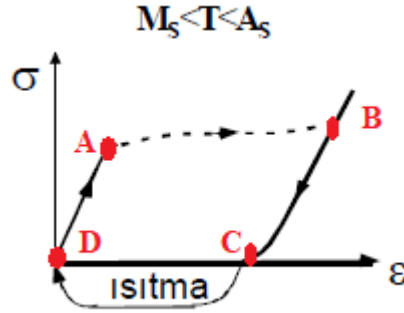
2.1.1. Şekil Hafıza Etkisi

ŞHE, termoelastik martenzitik dönüşüm geçiren ŞHA özelliğidir [20]. A_s sıcaklığının altında deformasyona uğrayan malzeme, A_f sıcaklığının üzerine ısıtılırsa meydana gelen tersine dönüşüm sayesinde önceki ilk şekline geri döner ve bu olaya ŞHE denilmektedir [21].

Şekil 2.3a’da ana faz (östenit) yapısındaki alaşım soğutulduğunda, dış şeklinde herhangi bir değişim meydana gelmeden iç yapısı Şekil 2.3b’deki martenzite dönüşür. Bu sıcaklıkta malzemeye kalıcı şekil değişimi verilir (Şekil 2.3c). Alaşımın ısıtılarak ana faz yapısına dönüşebilmesi (Şekil 2.3d), alaşımın ancak ilk östenitik yapıdaki şekline geri dönmesi ile mümkün olur. [23, 27].

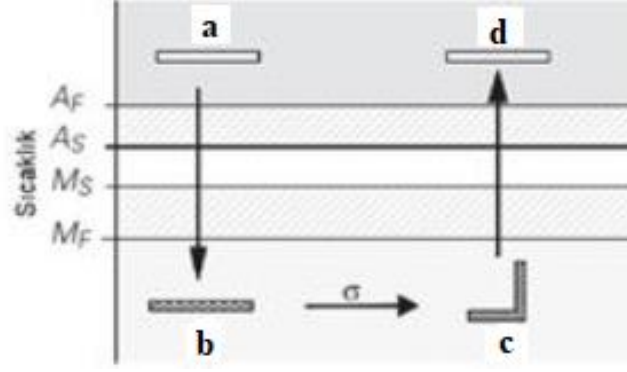
2.1.1.1. Tek Yönlü Şekil Hafıza Etkisi

ŞHE gösteren ŞHA'lar stres altında düşük sıcaklıkta deforme olabilmektedir. ŞHA A_f sıcaklığının üzerine ısıtılmaya başlatıldığında östenitik faz dönüşüm ile ilk şekline geri dönmektedir. ŞHA'larda tek yönlü ŞHE'nin gerilim-gerinim eğrisi Şekil 2.5'de gösterilmektedir.



Şekil 2.5. ŞHA'larda tek yönlü ŞHE [31].

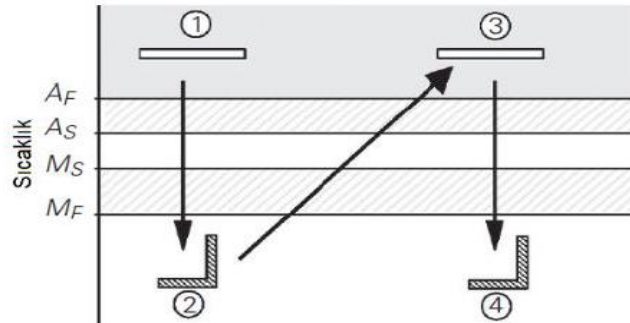
ŞHA numunesi mekanik bir yüke tabi tutulduğunda gerilme kritik bir noktaya gelmekte (A), uygulanan yük kristal yapıda değişim meydana getirmekte (B), ve uygulanan yük ortadan kaldırıldığında (C) kalıntı gerinmeler meydana gelmektedir. Kalıntı gerinmeler östenit bitiş sıcaklığına ısıtılmasıyla giderilmekte ve ŞHA numuleri eski şeklini geri kazanabilmektedir (C→D) [1]. ŞHA malzemesi östenit bitiş sıcaklığı üzerindeki bir sıcaklık değerinden (Şekil 2.6a) martenzit bitiş sıcaklığı değerine soğutulduğunda (Şekil 2.6b) faz dönüşümü gerçekleşmektedir. Sabit bir sıcaklık değeri altında, martenzit bitiş sıcaklığı bölgesinde mekanik bir yük altında (Şekil 2.6c) ŞHA numunesinde artık gerinme meydana gelmektedir. Sonrasında numunenin östenit bitiş sıcaklığına tekrar ısıtılmasıyla (Şekil 2.6d) martenzitik dönüşüm meydana gelmekte, artık gerinmeler ortadan kaldırılarak ŞHA numunesi ilk şekline geri dönebilmektedir. Deformasyona uğrayan ŞHA'ların ısıtılmasıyla deformasyon öncesi şeklini geri kazanabilmektedir. Bu olaya "tek yönlü ŞHE" olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.6. ŞHA'larda tek yönlü ŞHE faz dönüşümü sonrasında artık gerilmelerin kaldırılması [31].

2.1.1.2. Çift Yönlü Şekil Hafıza Etkisi

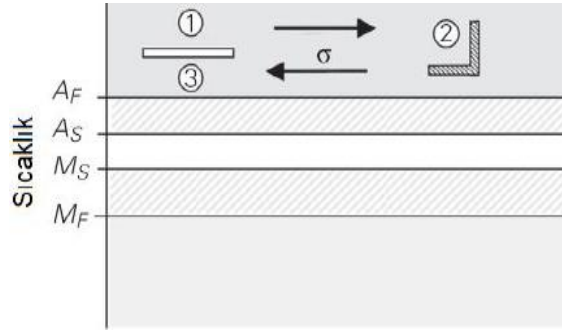
Sıcaklık değişimi, herhangi bir mekanik yükleme meydana gelmeksizin numunenin şeklinde (formunda) bir değişiklik meydana getirmekte ise bu duruma “çift yönlü ŞHE” olarak adlandırılmaktadır [1, 31]. Çift yönlü ŞHE elde etmek için ŞHA'ların eğitilmesi gerekmektedir. Eğitimle ilgili birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları ŞHE döngüleri ve gerilme kaynaklı martenzit eğitimi olarak bilinmektedir. Çift yönlü ŞHE'nin şematik bir görüntüsü Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Eğitilmiş bir ŞHA'ın Af sıcaklığından “1” Mf sıcaklığına “2” soğutulması faz değişikliğine yol açmaktadır (A→M). Sıcaklık Af'nin üstüne tekrar çıkartıldığında (2→3), herhangi bir gerilme uygulanmaksızın numune eski şeklini (formunu) geri alabilmektedir. Tekrar Mf sıcaklığına soğutulmuş numune “4” martenzit yapıdaki şeklini geri kazanabilmektedir [1, 31].



Şekil 2.7. ŞHA'larda çift yönlü ŞHE [31].

2.2. SÜPERELASTİK DAVRANIŞ

Süperelastik özelliğe sahip ŞHA'lar, mekanik yüklemeler (kuvvet) sonrası şekillerini (formlarını) geri kazanabilmesi için östenitik ve martenzitik fazlar arasındaki geçişlere ihtiyaç duymamaktadır. Süperelastik davranış, dönüşüm sıcaklığının üzerinde ŞHA'ların kısmen östenitik faz yapısında meydana gelmektedir. Östenit faz yapısındaki "1" süperelastik ŞHA'lara gerilme uygulanması "2", gerilme kaynaklı bir faz dönüşümüne ($A \rightarrow DM$) neden olmaktadır ve bu durumun şematik gösterimi Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Uygulanan gerilim ortadan kaldırıldığında ($2 \rightarrow 3$), malzemenin eski şekli (hali) ve kristal formu (şekli) geri kazanılarak tekrar östenit fazına dönüşü gerçekleşebilmektedir [1, 31].



Şekil 2.8. ŞHA'ların süperelastik davranışı [31].

Süperelastik malzemeler, büyük geri kazanılabilir deformasyona sahip bir malzemenin kullanılmasını gerektiren uygulamalara örnek malzemelerdir. Süperelastik davranışın diğer bir önemli özelliği, doğrusal olmayan gerilim-şekil değiştirme yeteneğine sahip olmasıdır [1, 32].

2.3. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER

Piezoelektrik malzemeler, elektrik sinyallerini harekete ve hareketi elektrik sinyallerine dönüştüren akıllı malzemeler grubunda yer almaktadır. Bu özellikleri nedeniyle aktüatör ve dönüştürücü gibi birçok ileri teknolojik uygulamalarda/alanlarda kullanılmaktadır [1]. Seramikler, polimerler ve kristaller olmak üzere başlıca piezoelektrik malzemeler bulunmaktadır. Piezoelektrik seramikler ve polimerler, sensör, dönüştürücü ve güç üreticilerde kullanıma elverişli

olmaları nedeniyle ticari uygulamalarda/alanlarda tercih edilmektedir. Piezoelektrik kristaller ise radyo gibi haberleşme uygulama alanlarında, mikrofonlarda kullanılmaları ile bilinmektedir [1].

Uygulanan bir mekanik kuvvet altında elektrik yükü üretimi ile “doğrudan” piezoelektrik etki oluşturma yeteneğine sahiptir [33]. Bu durumun tersi ise “dolaylı/ters” piezoelektrik etkidir. Dolaylı piezoelektrik etki, piezoelektrik malzemeye uygulanan bir elektrik alanın kısalma ya da uzama ile neticelenmesidir [1, 34]. Piezoelektrik malzemeler elektroelastik malzemeler olarak da bilinmektedir.

2.3.1. Piezoelektrik Seramikler

Titreşim ya da basınç uygulanması sonucu elektrik enerjisi üretme veya üzerlerine elektrik enerjisi uygulanması ile titreşim üretmesi özelliklerine/yeteneklerine sahip olan seramikler “piezo-seramik” malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Piezo seramiklerin elektrik enerjisi üretebilmesi için, seramik üzerine bir baskı, esneme yada titreşim kuvveti uygulanması gerekmektedir. Bu kuvvetlerden herhangi biri uygulandığında, seramiğin yapısındaki pozitif yükler bir tarafta, negatif yükler diğer tarafta toplanmaktadır. Bu kutuplaşma neticesinde seramiğin iki kutbu arasında potansiyel fark meydana gelmekte ve bu sayede elektrik enerjisi üretilebilmektedir [35].

2.3.2. Piezoelektrik Polimerler

Seramik malzemelerin kırılma özelliği göstermeleri, büyük yüzey alanlarında veya kompleks (karmaşık) şekillerde üretilmelerine engel olmaktadır. Bu dezavantaj durumu farklı yapılardaki piezoelektrik malzemelerin üzerine gerçekleştirilen araştırmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur. Polimer malzemelerin piezoelektrik özellikleri ilk olarak 1923’de kez Polivinilidin Florür (PVDF) üzerinde piezoelektrik davranışın keşfedilmesiyle piezoelektrik polimerler, seramik malzemedeki kaynaklanan birçok dezavantajı ortadan kaldırmıştır [1, 36-38].

Piezoelektrik özellik gösteren polimer bir malzemeye voltaj uygulandığında, uygulanan voltajın değeriyle orantılı olarak malzeme incelebilmekte, uzayabilmekte

veya genişleyebilmektedir. Tam tersi bir uygulamada yani piezoelektrik özellik gösteren polimer bir malzemeye mekanik bir kuvvet uygulandığında (sıkıştırma ya da esnetme/germe), uygulanan kuvvetin büyüklüğü ile orantılı olarak bir voltaj üretimi gerçekleşebilmektedir [36].

2.3.3. Piezoelektrik Kristaller

Piezoelektrik kristaller, ilk keşfedilen piezoelektrik malzemelerdir. Kristallerin piezoelektrik davranış sergilemeleri için malzemelerin kristalografik doğrultuları dikkate alınarak kesmek ve şekillendirmek gerekmektedir [1]. Rochelle tuzu, kuvars, lityum niyobat, turmalin ve lityum tantalat piezoelektrik kristallere örnek gösterilebilmektedir. Kuvars kristali ivmeölçer sistemlerinde, turmalin ticari hidroforlarda rochelle tuzu hoparlör, mikrofon ve telefon alıcılarında kullanılmaktadır [36]. Kristaller çok kararlı olduklarından dolayı algılayıcılar için uygun olarak kabul edilmektedirler. Ancak piezoelektrik seramiklerin bulunmasından sonra seramikler, kristal malzemelerin yerini almıştır [1].

2.4. ŞEKİL HAFIZALI POLİMERLER

Polimer malzemelerin elastik hafızalarının olduğu ilk kez 1941'de keşfedilmiştir. ŞHP çalışmaları polietilenlerle 1960'larda başlamıştır. 1980'lerin sonundan itibaren ŞHP'lere olan ilgi gün geçtikçe artmıştır, 2006'da yapılan bir araştırmaya göre de bu konuda çıkan yayınların %40'ı Japonya'da yazıldığı ortaya konulmuştur [38].

ŞHP'ler deforme olduktan sonra gerilmesiz ortamda bir sinyalle uyarıldığında, tekrardan şekil değiştirme öncesi (ilk hali) şekline geri dönen malzemelerdir. Polimer malzemeler de, mekanizma olarak ŞHA'lardan tamamen farklı olsa da hafıza özelliğine sahiptirler. Polimerlerdeki şekil hafızası davranışı yüksek miktarda geri döndürülebilir şekil (form) değişimi ve boyutsal geri dönme kararlılığına olarak tanımlanmıştır. Isıl dönüşümlerin ŞHP'ler üzerinde gerilme çekmesi, boyutsal geri dönme kararlılığı ve gerilme salması gibi etkileri olmaktadır. ŞHP'lerde şekil hafızası mekanizması polimer ağının çok çeşitli elastisite özellikleri sayesinde farklı yollar ile elde edilebilmektedir [39].

2.5. MAGNETOSTRİKTİF MALZEMELER

Manyetik alan etkisinde olan magnetostriktif malzemelerin içyapısındaki elektronlar yeniden düzenlenmektedir. Manyetik alana maruz kaldığında yer değiştirme oluşturan magnetostriktif malzeme için tersinirlik söz konusu olmaktadır. Yani kuvvete maruz kalan magnetostriktif malzemelerin de manyetik indüklemesi değişmektedir. Bu bakımdan piezoelektrik malzemeler ile benzer özellik gösteren magnetostriktif malzemelerin nikel, kobalt, demir, gibi bilinen tipleri oldukça düşük seviyede tepki oluşturmaktadırlar. Bu nedenle genellikle düşük frekanslı ve yüksek güçlü dönüştürücü, motor ve hidrolik eyleyicilerde kullanılmaktadır. Yüksek kuvvet kapasitelerine karşın kırılğan yapıları, ağır olmaları ve tepki vermedeki gecikmeleri nedeniyle dezavantajlıdır. Piezoelektrik ve elektrostriktif malzemelere kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilen magnetostriktif malzemelerin günümüzde en yaygın kullanılanı Terfenol-D'dir [40].

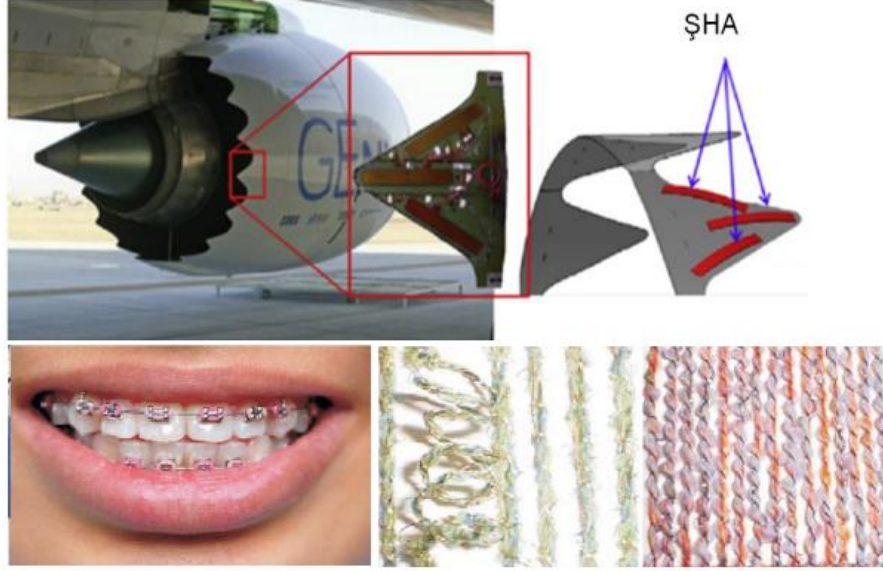
2.6. AKILLI MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI

Akıllı malzemeler konusunda gerçekleştirilen araştırma/geliştirme çalışmaları, hem akademik hem de ticari (endüstriyel) alanlarda günden güne önem kazanmaktadır. Bu bağlamda farklı alanlarda (havacılık ve uzay çalışmaları, otomotiv, haberleşme, tıp, inşaat gibi) kullanılabilir pek çok akıllı malzeme ürünün ortaya çıkmasını sağlamaktadır [41, 42]. ŞHA'lar günümüz uygulamalarında kullanılan akıllı malzemelerdir.

2.6.1. Şekil Hafızalı Alaşımların Uygulama Alanları

ŞHA'lar süperelastik ve biyouyumluluk özellikleri ile biyomedikal, mukavemet ve korozyon direnci özellikleri nedeniyle mühendislik uygulama alanlarına sahiptir [41, 43]. Günümüzde ise tekstil ve uzay da olmak üzere farklı alanlarda hem günlük hem de endüstriyel gibi birçok uygulamalarda kullanılmaktadır (Şekil 2.9). Tıpta kullanılan cerrahi araçlar, kılavuz telleri, ortodontik ve ortopedik malzemeler,

implante edilebilen cihazlar ŞHA'ların biyomedikal uygulamalarına örnek olarak verilebilir.



Şekil 2.9. ŞHA'ların çeşitli kullanım alanları [44].

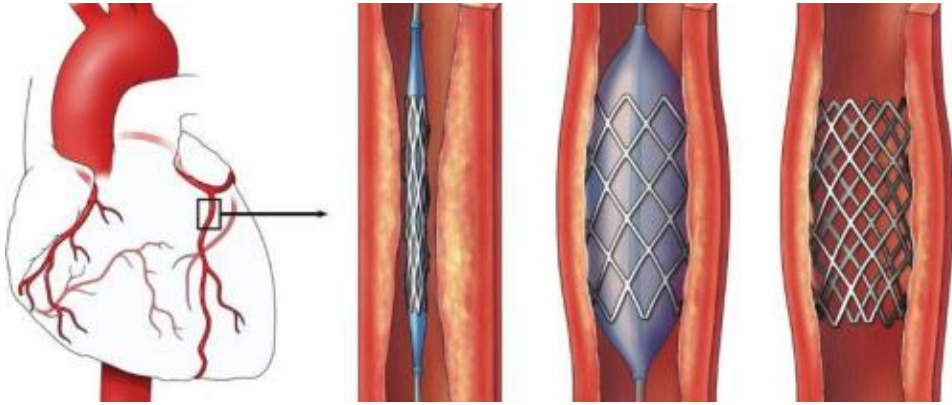
ŞHA'larla ilgili uygulamalarda, büyük ilerlemeler gerçekleşmesine rağmen, uygulamalarda hala bazı problemler meydana gelmektedir [45]. Tıp alanında kullanılan malzemeler, özellikle insan vücudunda kullanılan implantlar kullanılan yere bağlı olarak biyouyumlu, biyofonksiyonlu ve biyodayanıklı olmak zorundadır [41].

Biyomedikal uygulamalarda da oldukça fazla kullanım alanına sahip olan ŞHA'lardan biri olan ortodontik diş telleri, çarpık dişleri dış kuvvet uygulayarak düşey mesafede uygun aralığa yerleştirmekte kullanılmaktadır (Şekil 2.10). Biyomedikal alandaki farklı bir kullanım örneğinde, kalp damar tıkanıklıklarının ameliyatsız tedavisinde kullanılan stentlerdir. Stentler radyal bir yay formuna (şekline) sahip olup, damar tıkanıklığının bulunduğu bölgeye (alana), büzülmüş olarak bir baloncuk vasıtasıyla yerleştirilirler. Baloncunun çekilmesi ile vücut sıcaklığına (36.5°C ile 37.2°C arası) ulaşan stent şekil bellek etkisi ile, dönüşüm göstererek, büzüştürülmeden önceki çapına (ilk şekline) genişlemek ister ve damara genişleme yönünde bir kuvvet uygular. Damar çeperinin genişlemesi ile sonuçlanan bu süreç, tıkanık olan damarın yüksek oranda açılmasını sağlar [46].



Şekil 2.10. Diş teli uygulamalarında ŞHA'ların uygulama örnekleri [41, 47].

Şekil 2.11'de ŞHA'ların kalp ve damar tıkanıklığında kullanılan stent uygulaması gösterilmektedir [47].



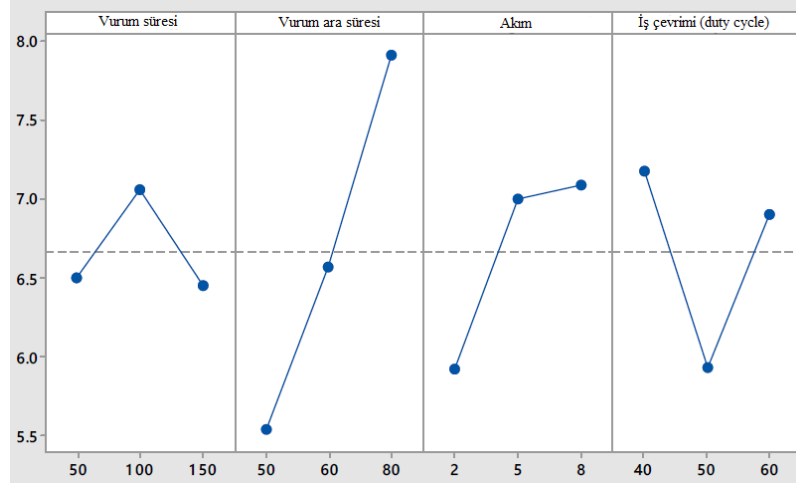
Şekil 2.11. ŞHA'ların kalp ve damar tıkanıklığında kullanılan stent uygulaması [47].

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. NİKEL-TİTANYUM ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN ELEKTRO EROZYON TEZGAHINDA İŞLENMESİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALARI

Gangele ve Mishra, “NiTi ŞHA EEİ yöntemiyle işlenmesinde ortalama yüzey pürüzlülüğünün Taguchi yaklaşımıyla optimizasyonu” çalışmalarında; akım, vuruş süresi, vuruş ara süresi ve iş çevrimi (duty cycle) parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, farklı parametreler ve bu parametrelerin farklı değerlerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemleri sonucunda minimum ortalama yüzey pürüzlülük değerini elde etmeyi amaçlamışlardır. Ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümünde “Mitutoyo” marka ölçüm cihazı kullanmışlardır. Talaş kaldırma işlemleri, Taguchi'nin L₉ ortogonal dizisi kullanılarak farklı akım (2, 5, 8 A), vuruş süresi (50, 100, 150 µs), vuruş ara süresi (50, 60, 80 µs) ve iş çevrimi (%40, %50, %60) değerlerinde, bakır elektrot kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda araştırmacılar; vuruş ara süresi değerinin artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerinde %45 (50 → 80 µs), akım değerinin artmasıyla %20 (2 → 8 A) artış gözlemlemişlerdir (Şekil 3.1). Araştırmacılar minimum ortalama yüzey pürüzlülük (5,01 µm) değerini; 8A darbe akımı, 150 µs vuruş süresi, 50 µs vuruş ara süresi ve %50 iş çevrimi değerlerinde elde etmişlerdir (Çizelge 3.1) [48].



Şekil 3.1. Deneysel parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkileri [48].

Çizelge 3.1. Gri ilişki analizi ile elde edilen deneysel parametrelerinin etki düzeyleri [48].

Deneysel seviyesi	Vurum süresi (µs)	Vurum ara süresi (µs)	Darbe akımı (A)	İş çevrimi (duty cycle) %	R _a (µm)	Sinyal/Gürültü oranı
1	50	50	2	40	5,12	-14 1854
2	50	60	5	50	5,99	-15 5485
3	50	80	8	60	8,39	-18 4752
4	100	50	5	60	6,49	-16 2449
5	100	60	8	40	7,88	-17 9305
6	100	80	2	50	6,82	-16 6757
7	150	50	8	50	5,01	-13 9968
8	150	60	2	60	5,83	-15 3134
9	150	80	5	40	8,52	-18 6088

Gaikwad ve ark., NiTi ŞHA'ların EEİ ile işlemede işleme parametrelerinin optimizasyonu çalışmalarında; akım, vurum süresi, vurum ara süresi, iş parçası elektrik iletkenliği ve takım elektrik iletkenliği parametrelerinin talaş kaldırma oranı ve takım aşınma oranına etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde en düşük takım aşınma oranı ve en yüksek talaş kaldırma oranı değerini elde etmeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar, talaş kaldırma işlemlerini Taguchi L₃₆ (2² x 3³) ortogonal dizisi kullanılarak; üç farklı akım (8, 12, 16 A), vurum süresi (13, 26, 38 µs), vurum ara süresi (5, 7, 9 µs), ve iki farklı iş parçası elektrik iletkenliği (3,267-4

219 S/m) ile takım elektrik iletkenliği (10 000 – 26 316 S/m) değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. İlgili parametreler doğrultusunda; Ø20 x 20 mm ölçülerine sahip NiTi ŞHA'ları kriyojenik ortamda (-185 °C) bakır elektrot kullanılarak işlemleridir. Gerçekleştirilen talaş kaldırma deneyleri sonucunda; en düşük takım aşınma oranı (0,0410 mm³/dk) ve en yüksek talaş kaldırma oranının (6,31 mm³/dk); 16 A akım, 38 µs vuruş süresi, 9 µs vuruş ara süresi, 4 219 S/m iş parçası elektrik iletkenliği ve 26 316 S/m takım elektrik iletkenliği değerlerinde elde edildiğini gözlemlenmişlerdir (Çizelge 3.2) [49].

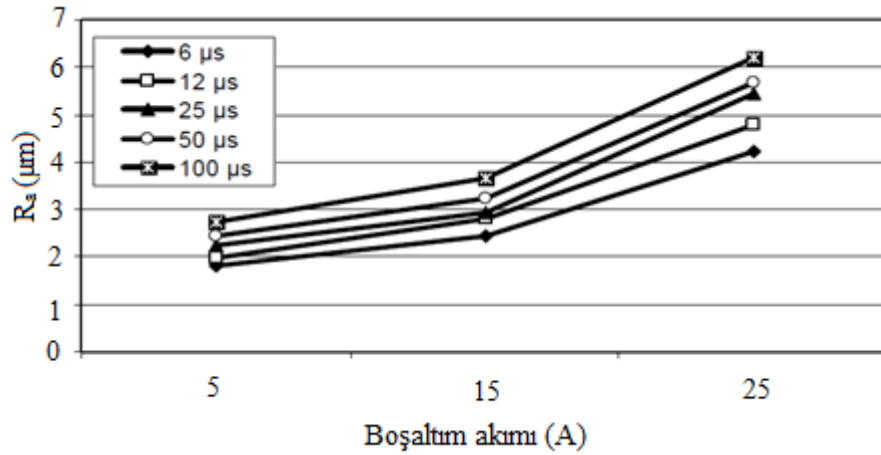
Çizelge 3.2. Farklı deney parametrelerinde elde edilen talaş kaldırma oranı ve takım aşınma oranı değerleri [49].

Deney seviyesi	İş parçası elektrik iletkenliği (S/m)	Takım elektrik iletkenliği (S/m)	Akım (A)	Vuruş süresi (µs)	Vuruş ara süresi (µs)	Talaş kaldırma oranı (mm ³ /dk)	Takım aşınma oranı (mm ³ /dk)
1	3 267	10 000	8	13	5	1,09	0,0700
2	3 267	10 000	12	38	7	4,56	0,0769
3	3 267	10 000	16	63	9	5,56	0,0873
4	3 267	10 000	8	13	5	1,08	0,0698
5	3 267	10 000	12	38	7	4,57	0,0773
6	3 267	10 000	16	63	9	5,57	0,0873
7	3 267	10 000	8	13	7	1,06	0,0673
8	3 267	10 000	12	38	9	4,51	0,0679
9	3 267	10 000	16	63	5	5,63	0,0980
10	3 267	26 316	8	13	9	1,32	0,0266
11	3 267	26 316	12	38	5	4,29	0,0299
12	3 267	26 316	16	63	7	4,91	0,0444
13	3 267	26 316	8	38	9	1,97	0,0256
14	3 267	26 316	12	63	5	3,62	0,0256
15	3 267	26 316	16	13	7	5,07	0,0479
16	3 267	26 316	8	38	9	1,96	0,0254
17	3 267	26 316	12	63	5	3,68	0,0249
18	3 267	26 316	16	13	7	5,02	0,0488
19	4 219	10 000	8	38	5	3,91	0,0520
20	4 219	10 000	12	63	7	4,23	0,0811
21	4 219	10 000	16	13	9	6,4	0,1119
22	4 219	10 000	8	38	7	3,68	0,0459
23	4 219	10 000	12	63	9	4,14	0,0702
24	4 219	10 000	16	13	5	6,82	0,1678
25	4 219	10 000	8	63	7	2,85	0,0364
26	4 219	10 000	12	13	9	5,42	0,1237
27	4 219	10 000	16	38	5	7,08	0,0808
28	4 219	26 316	8	63	7	2,41	0,0224
29	4 219	26 316	12	13	9	5,76	0,0496
30	4 219	26 316	16	38	5	6,36	0,0615
31	4 219	26 316	8	63	9	2,29	0,0168

Çizelge 3.2 (devam ediyor).

32	4 219	26 316	12	13	5	5,84	0,0578
33	4 219	26 316	16	38	7	6,34	0,0559
34	4 219	26 316	8	63	5	2,98	0,0246
35	4 219	26 316	12	13	7	5,78	0,0516
36	4 219	26 316	16	38	9	6,31	0,0410

Coşkun ve Işık, “Elektro erozyon yöntemi ile tornalama” çalışmalarında klasik torna tezgahına eklemiş oldukları divizör sistemiyle EEİ tezgâhı tasarlamışlardır. Tasarlanan bu tezgâh ile araştırmacılar, elektrik güç kaynağı, mekanik ve eksenel hareket kontrol sisteminin uygulamasını gerçekleştirmeyi ve EEİ ile tornalama işleminde ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Araştırmacılar, yapılan deneylerde iş parçası numunesi olarak 20 mm çapında Ç2080 takım çeliği, bakır elektrotlar ve dielektrik sıvı (motorin), deney parametresi olarak boşaltım akımı (5, 10, 15, 20 ve 25 A) ve vurum süresi (6, 12, 25, 50 ve 100 μ s) ile sabit devre gerilimi (80 V) kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, düşük boşaltım akımı (5 A) ve vurum süresinde (6 μ m) en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğün ($R_a=2 \mu$ m) elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Boşaltım akımı (15 A) ve vurum süresinin (12 μ m) artması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerinin arttığını tespit etmişlerdir (Şekil 3.2) [50].



Şekil 3.2. Farklı akım ve vurum sürelerine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri [50].

Daneshmand ve ark., “NiTi ŞHA’ların döner takım elektrotlu EEİ yöntemiyle yapılan deneysel çalışmalar” adlı çalışmalarında; akım, voltaj, vurum süresi ve

vurum ara süresi parametre değerlerinin talaş kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, 50x60x20 mm ölçülerine sahip NiTi ŞHA numunesini bakır elektrot kullanılarak deiyonize sıvı içerisinde talaş kaldırma işlemlerine tabi tutmuşlardır. Döner takım elektrot devri 200 dev/dk olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar üç farklı akım (10, 15, 20 A), vurum süresi (35, 50, 100 μ s), vurum ara süresi (30, 70, 200 μ s) ve iki farklı voltaj (80, 250V) parametre değerlerinde gerçekleşmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda; döner takım elektrotlu EEİ yönteminde akım (10 \rightarrow 20 A), voltaj (80 \rightarrow 250 V) ve vurum süresi (35 \rightarrow 100 μ s) değerlerinin artırılması sonucu yaklaşık sırayla %129,16, %31,25 ve %32 oranlarında talaş kaldırma oranının artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Vurum ara süresi değerinin (30 \rightarrow 200 μ s) artması sonucunda talaş kaldırma oranının yaklaşık olarak %44 oranında azaldığını belirtmişlerdir. EEİ tezgahında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ise; akım, voltaj ve vurum süresi değerlerinin aynı oranda artırılması ile talaş kaldırma oranı değerlerinin yaklaşık olarak %176,15, %65,71 ve %71,87 oranlarında artış gösterdiğini, vurum ara süresi değerinin artması ile %30,18 oranında azalmayla sonuçlandığını bildirmişlerdir. Döner takım elektrotlu EEİ yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminde deneysel parametrelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini inceleyen araştırmacılar, vurum süresi ve voltaj değerlerinin artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerinin yaklaşık %44,72 ve %7,7 oranlarında artış, EEİ yöntemi ile yapılan talaş kaldırma işleminde ise %46,42 ve %25,37 oranlarında artış olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, deneysel parametrelerin takım aşınma oranı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Döner takım elektrotlu EEİ ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde, akım (10 \rightarrow 20 A) ve voltaj (80 \rightarrow 250 V) değerlerinin artmasıyla takım aşınma oranı değerlerinin; yaklaşık %200 ve %600 oranlarında artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda araştırmacılar, akım ve vurum süresi değerlerinin talaş kaldırma oranı değerine, vurum süresi ve voltaj değerlerinin ortalama yüzey pürüzlülük değeri üzerine etki eden en etkili parametre değerleri olduğunu tespit etmişlerdir. Takım aşınma oranı değerinin ise akım ve voltaj değerlerinin etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca döner takım elektrotlu EEİ yönteminin, geleneksel EEİ yöntemine kıyasla daha iyi sonuçlar elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır [51].

Kulkarni ve ark., 100x180x2 mm ölçülerine sahip Ni_{53.74}Ti_{44.13} alaşımların tel erozyon ile işlenmesinde işleme parametrelerin talaş kaldırma oranı üzerine yapmış oldukları çalışmalarında, işleme parametreleri olarak üç farklı vurum süresi (105, 115, 125 µs), vurum ara süresi (25, 40, 55 µs) ve elektrot ilerlemesi (4, 6, 8 mm/dk) kullanmışlardır. Talaş kaldırma işlemleri, Taguchi'nin L₂₇ ortogonal dizisi kullanılarak sabit akım (12 A) ve voltaj (40 V) değerlerinde Ø0.25 mm ölçüsüne sahip bakır tel elektrot kullanılarak deiyonize sıvı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek talaş kaldırma oranının (4,498 mm³/dk); 125 µs vurum süresi, 55 µs vurum ara süresi ve 8 mm/dk elektrot ilerlemesi değerlerinde elde edildiğini belirtmişlerdir (Çizelge 3.3) [52].

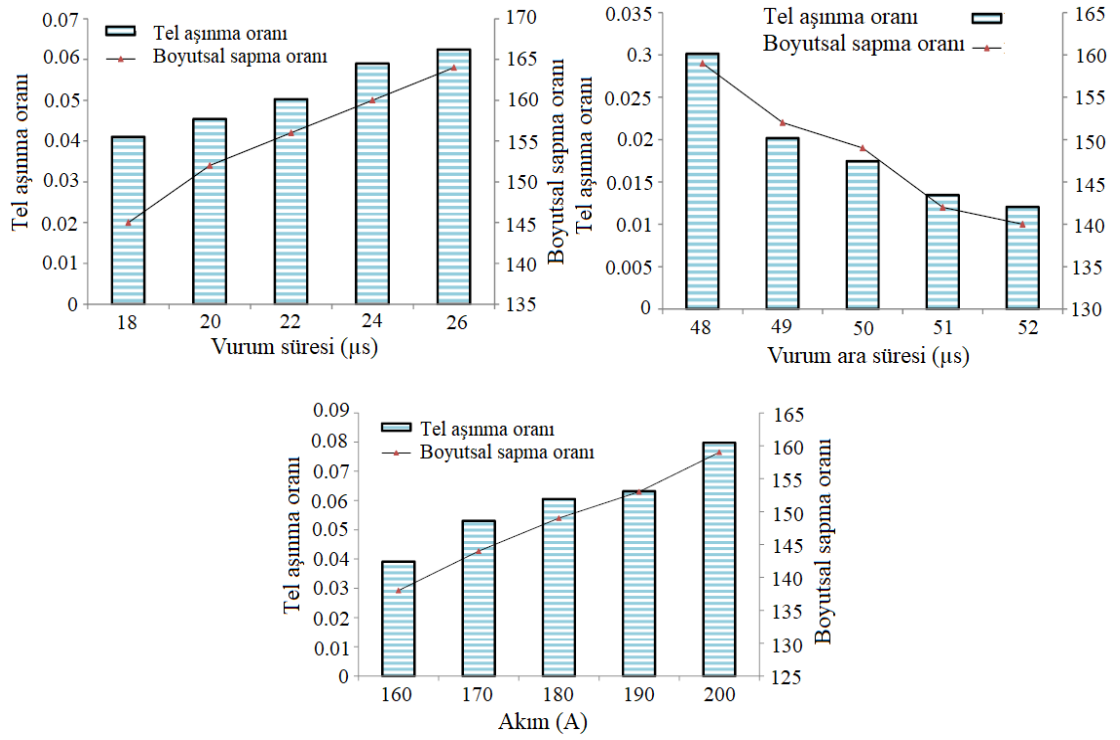
Çizelge 3.3. Farklı işleme parametrelerinde elde edilen talaş kaldırma oranı değerleri [52].

Deney seviyesi	Vurum süresi (µs)	Vurum ara süresi (µs)	Elektrot ilerlemesi (m/dk)	Talaş kaldırma oranı (mm ³ /dk)
1	105	2	4	2,302
2	105	25	6	2,337
3	105	25	8	2,236
4	105	40	4	3,011
5	105	40	6	2,971
6	105	40	8	3,054
7	105	55	4	1,687
8	105	55	6	1,538
9	105	55	8	1,709
10	115	25	4	0,486
11	115	25	6	3,706
12	115	25	8	2,761
13	115	40	4	3,496
14	115	40	6	3,312
15	115	40	8	3,536
16	115	55	4	2,992

Çizelge 3.3 (devam ediyor).

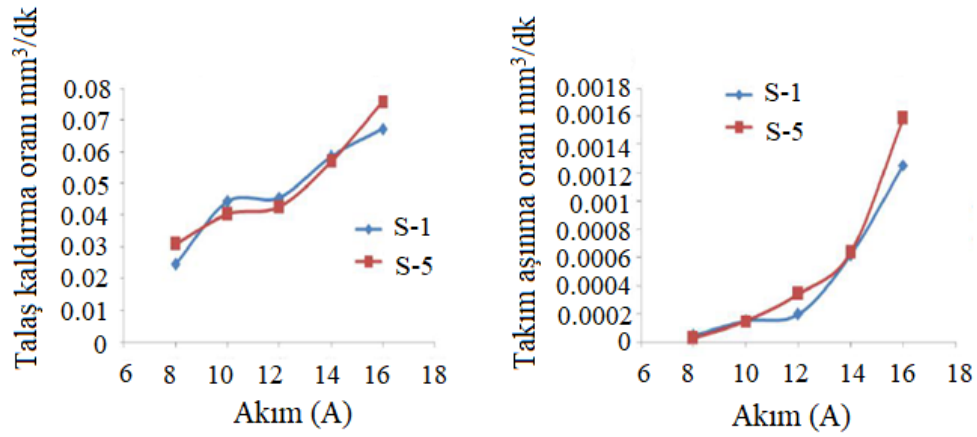
17	115	55	6	3,076
18	115	55	8	3,024
19	125	25	4	2,640
20	125	25	6	3,030
21	125	25	8	3,520
22	125	40	4	4,075
23	125	40	6	3,821
24	125	40	8	3,908
25	125	55	4	4,728
26	125	55	6	4,591
27	125	55	8	4,498

Bisaria ve Shandilya, NiTi ŞHA'nın tel erozyon ile işlenmesinde işleme parametrelerinin tel aşınma ve boyutsal sapma oranlarına etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar deneysel çalışmalarını; beş farklı vuruş süresi (18, 20, 22, 24, 26 μ s), vuruş ara süresi (48, 49, 50, 51, 52 μ s) ve akım (160, 170, 180, 190, 200 A) değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. Talaş kaldırma işlemleri Ni açısından zengin, 10x10x6 mm ölçülerine sahip Ni_{55,7}Ti ŞHA numunesi kullanılarak, dört eksenli bilgisayar sayısal kontrollü (CNC) tel erozyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Boyutsal sapma değeri "Mitutoyo" dijital mikrometre cihazı ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda vuruş süresi (18 → 26 μ s) ve akım (160 → 200 A) değerlerinin artırılmasıyla takım aşınma oranı değerlerinin %52 ve %100 artış gösterdiği, boyutsal sapma değerlerinin %14 ve %14,3 oranında artış gösterdiği belirtilmiştir (Şekil 3.3). Ayrıca vuruş ara süresinin (48 → 52 μ s) değerine artırılmasıyla takım aşınma ve boyutsal sapma değerlerinin %58 ve %12,5 oranında düşüş gösterdiği belirtilmiştir [53].



Şekil 3.3. Farklı işleme parametre değerlerinde elde edilen takım aşınma ve boyutsal sapma oranları değerleri [53].

Jatti ve Singh, kriyojenik işlem uygulanmış NiTi ŞHA'nın EEİ ile işlenmesinde; voltaj, vurum süresi, vurum ara süresi ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı değerlerinin talaş kaldırma ve takım aşınma oranı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar deneysel çalışmalarını; sabit voltaj (55 V), vurum süresi (38 μs), vurum ara süresi (7 μs), dielektrik sıvı püskürtme basıncı (0,5 kg/cm²) ve farklı akım (8, 10, 12, 14, 16 A) değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. Talaş kaldırma işlemlerini $\varnothing 20 \times 20$ mm ölçülerine sahip NiTi ŞHA'lar kullanılarak bakır elektrot vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda akımın; talaş kaldırma oranına etki eden en etkili parametre değeri olduğu belirtmişlerdir. (Şekil 3.4) [54].



Şekil 3.4. Akım değerinin talaş kaldırma ve takım aşınma oranı üzerindeki etkisi [54].

Sabouni ve Daneshmand, “Nikel-Titanyum ŞHA’ların EEİ ile işlenmesinde işleme parametrelerinin incelenmesi” adlı çalışmalarında; akım, vurum süresi, vurum ara süresi ve voltaj parametrelerinin talaş kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar talaş kaldırma işlemlerini deiyonize sıvı içerisinde Ø8x40 mm ölçülerine sahip grafit elektrot kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Deney numunesi olarak Ni₁₅₅Ti₄₅ ŞHA’lar kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarını Taguchi L₁₈ (2¹ x 3³) ortogonal dizisi kullanılarak üç farklı akım (10, 15, 20 A), vurum süresi (35, 50, 100 µs), vurum ara süresi (30, 70, 200 µs) ve iki farklı voltaj (80, 250 V) değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; akım değerinin talaş kaldırma oranına etki eden en etkili işleme parametre değeri olduğu belirtmişlerdir. Talaş kaldırma oranının; akım (10 → 20 A) değerinin artmasıyla arttığı, vurum süresi (35 → 100 µs) ve voltaj (80 → 250 V) değerlerinin artmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Elektrot aşınma oranının; vurum süresi (35 → 100 µs) ve vurum ara süresi (30 → 200 µs) değerlerinin artmasıyla azaldığı, voltaj (80 → 250 V) değerinin artmasıyla arttığı belirtmişlerdir [55].

Chen ve ark., Titanyum-Nikel-Krom (Ti₅₀Ni_{49.5}Cr_{0.5}) ve Titanyum-Nikel-Zirkonyum (Ti_{35.5}Ni_{49.5}Zr₁₅) alaşımlarının EEİ ile işlenmesinde; ilgili parametre değerlerinin (Çizelge 3.4) talaş kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkilerini incelemişlerdir [56].

Çizelge 3.4. İşleme parametreleri [56].

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
Akım (A)	3	6	10	19	-	-
Vurum süresi (μs)	3	6	12	25	50	100
Vurum ara süresi (μs)	3	6	12	25	50	100
Voltaj (V)	50	-	-	-	-	-

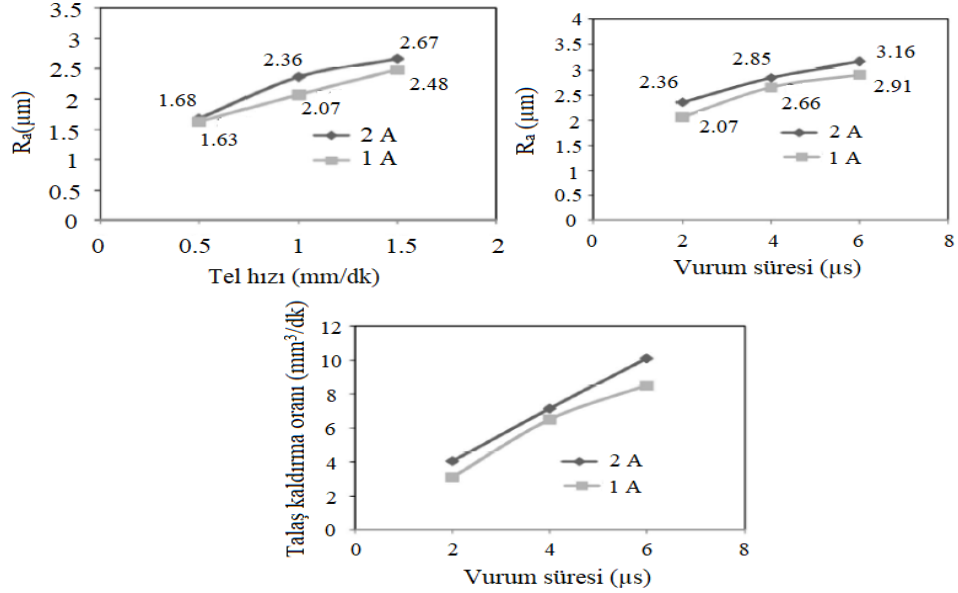
Ti₅₀Ni_{49.5}Cr_{0.5} ve Ti_{35.5}Ni_{49.5}Zr₁₅ alaşımları ark-eritme yöntemi kullanılarak hazırlayan araştırmacılar deneysel numuneler, elmas testere vasıtasıyla 55x20x5 mm ölçülerinde kesilerek, 900 °C sıcaklıkta vakumlu fırında 2 saat boyunca tavlama işlemi uygulamışlardır. Talaş kaldırma işlemleri dielektrik sıvı (kerosen (gaz yağı)) içerisinde bakır elektrot vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar deneysel çalışmalar sonucunda; Ti₅₀Ni_{49.5}Cr_{0.5} alaşımı Ti_{35.5}Ni_{49.5}Zr₁₅ alaşımına kıyasla sabit akım (10 A) ve farklı vurum süresi değerlerinde (3, 6, 12, 25, 50, 100 μs) talaş kaldırma oranı değerinin artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bu durumun termal iletkenlik ve erime sıcaklığı ile ters orantılı olduğunu belirtmişlerdir (Çizelge 3.5) [56].

Çizelge 3.5. Deney numunelerinin termal iletkenlik değerleri [56].

Alaşımlar	Termal İletkenlik (W x cm ⁻¹ x °C ⁻¹)
Ti ₅₀ Ni _{49.5} Cr _{0.5}	310,1
Ti _{35.5} Ni _{49.5} Zr ₁₅	470,4

Daneshmand ve ark., NiTi ŞHA'nın tel erozyon yöntemi ile işlenmesinde akım, vurum süresi ve tel hızı parametre değerlerinin talaş kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar farklı akım (1, 2 A), vurum süresi (2, 4, 6 μs) ve tel hızı (0.5, 1, 1.5 mm/dk) parametre değerlerinde pirinç elektrot vasıtasıyla deiyonize sıvı ortamında gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda araştırmacılar; sabit iki farklı akım (1, 2 A) değerlerinde vurum süresi (2 → 6 μs) değerinin artmasıyla talaş kaldırma oranı değerinin %166,5 ve %150 oranlarında, ortalama yüzey pürüzlülük değerinin ise %40,6 ve %34 oranlarında artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca

tel hızı değerinin (0,5 → 1,5 mm/dk) artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerinin %52,15 ve %59 oranlarında arttığını belirtmişlerdir (Şekil 3.5) [57].



Şekil 3.5. Deneysel parametrelerinin talaş kaldırma oranına ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine etkisi [57].

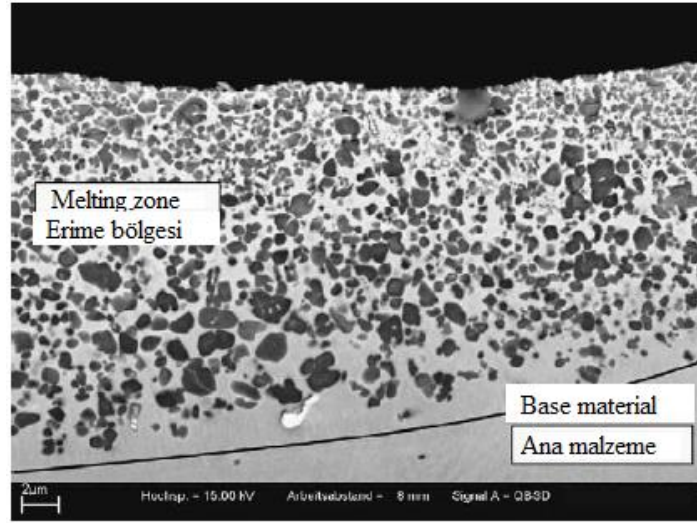
Bisaria ve Shandilya “NiTi ŞHA’ların tel erozyon ile işlenmesinde parametrelerinin incelenmesi” adlı çalışmalarında; akım, vuruş süresi ve vuruş ara süresi parametre değerlerinin talaş kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar deney numunesi olarak 10x10x6 mm ölçülerinde Ni_{55.7}Ti_{44.24} ŞHA’lar kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarını “Electronica Sprintcut-734” tel erozyon cihazında deiyonize sıvı ortamında 0,25 mm çapında pirinç elektrot kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Talaş kaldırma işlemleri Çizelge 6’da verilen işleme parametre değerlerinde gerçekleşmiştir [58].

Çizelge 3.6. İşleme parametreleri [58].

Parametreler	Parametre değerleri				
Akım	160	170	180	190	200
Vuruş süresi	18	20	22	24	26
Vuruş ara süresi	48	49	50	51	52
Voltaj	7 V				
Dielektrik sıvı püskürtme basıncı	7 kg/cm ²				
Ortam sıcaklığı	25 °C				

Deney parametre değerlerinin talaş kaldırma oranı değerine etkilerini inceleyen araştırmacılar; akım (160 → 200 A) değerinin artmasıyla %100, vurum süresi (18 → 26 μ s) değerinin artmasıyla %350 artış ve vurum ara süresi (48 → 52 μ s) değerinin artmasıyla talaş kaldırma oranı değerinin %200 azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca ilgili parametre değerlerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri üzerine etkilerini inceleyen araştırmacılar, akım (160 → 200 A) değerinin artmasıyla %100, vurum süresi (18 → 26 μ s) değerinin artmasıyla %18,5 oranlarında artış, vurum ara süresi (48 → 52 μ s) değerinin artmasıyla %150 oranında azaldığını gözlemlemişlerdir [58].

Theisen ve Schuermann, NiTi ŞHA'ların EEİ ile işlenmesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarında optimum işleme parametrelerini belirlemek amacıyla iş parçası yüzeyinde meydana gelen mikro yapısal modifikasyonları araştırmışlardır. Çalışmalarında, oda sıcaklığında östenitik fazda olan NiTi ŞHA'ları hidrokarbon bileşiklerinden sentetik olarak üretilen Aralux tipi bir dielektrik sıvı ortamda Tungsten-Bakır (WCu) elektrot kullanımıyla talaş kaldırma işlemine tabi tutmuşlardır. Araştırmacılar, deneysel çalışmalarını sabit çalışma gerilimi (240 V), talaş kaldırma oranı (4 mm³/dk), darbe boşluk oranı (%80) ve boşta darbe oranı (%40) ile dört farklı akım (2, 3, 4 ve 6 A), ile frekans değerlerinde (10, 20, 5 ve 10 kHz) gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda akımın (2 A) düşük olduğu talaş kaldırma işlemlerinde işlenen deney numunesinin yüzey pürüzlülük değerinin düşük olduğu (14 μ m), artan akım ve frekans değerleri ile yüzey pürüzlülük oranının arttığını belirtilmişlerdir. Araştırmacılar, iş parçası numunesinin mikro yapı analiz sonuçlarını Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) cihazı ile incelemişlerdir. SEM analizleri sonucunda işlenmiş parça yüzeyinde Titanyum Karbür (TiC) çökeltileri ile karşılaştıklarını belirtmişlerdir (Şekil 3.6). Bu durumun iş parçası ile elektrot arasında oluşan kısa devre sebebiyle dielektrik sıvı içerisinde bulunan hidrokarbon molekülleri arasındaki bağları koparmasından kaynaklandığını vurgulamışlardır [59].

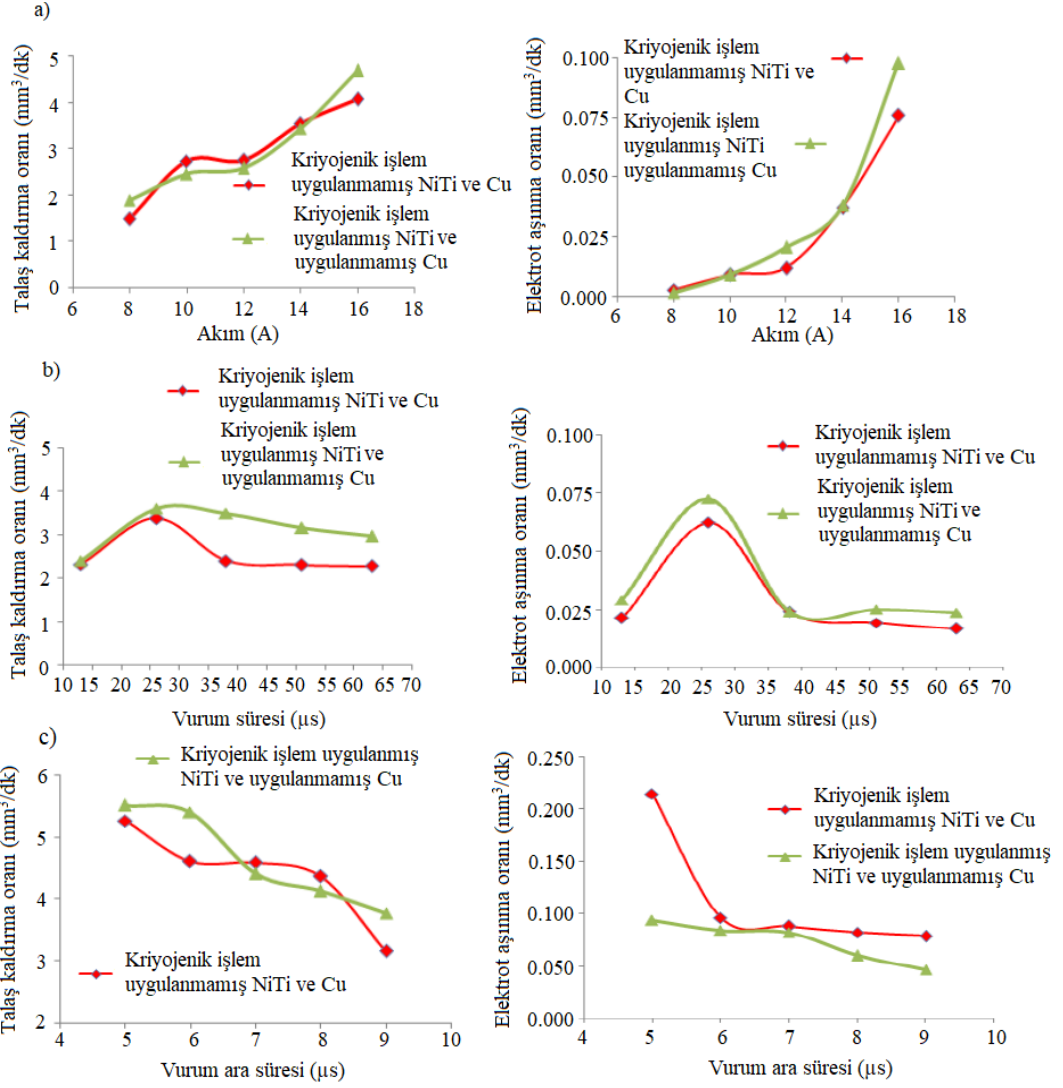


Şekil 3.6. İşlenmiş NiTi’de TiC çökelmelerinin SEM görüntüleri [59].

Rasheed ve ark., NiTi ŞHA alaşımları mikro EEİ ile işlenmesinde optimum işleme parametrelerini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, kapasitans ve voltaj parametrelerinin talaş kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarında Ni_{55.8}Ti_{44.2} süperelastik ŞHA kullanan araştırmacılar, talaş kaldırma işlemlerinde farklı kapasitans (155, 475 pF) ve voltaj (80, 100 V) değerlerini incelemeyi planlamışlardır. Araştırmacılar, Taguchi L₂₄ ortogonal dizisine göre belirlenen kapasitans ve voltaj parametrelerinde, silindirik çubuk formunda olan pirinç elektrot ile deiyonize sıvı içerisinde talaş kaldırma işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda pirinç elektrot kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde maksimum talaş kaldırma oranının (0,000953832 mm³/dk); yüksek kapasitans (475 pF) ve voltaj (100 V) değerlerinde gerçekleştirdiğini tespit etmişlerdir [60].

Gaikwad ve ark., kriyojenik işlem uygulanmış NiTi ŞHA’larını EEİ ile işleme yöntemiyle talaş kaldırma işlemine tabi tutmuşlardır. Talaş kaldırma işlemlerinde akım, voltaj, vurum süresi ve vurum ara süresi parametre değerlerinin, talaş kaldırma oranı ve takım aşınma oranı değerleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deney numunesi olarak kriyojenik işlem uygulanmış (-185°C) ve uygulanmamış NiTi ŞHA’lar kullanan araştırmacılar; talaş kaldırma deneylerini bakır elektrot (kriyojenik işlem uygulanmış/uygulanmamış ((-185°C)) kullanılarak dielektrik sıvı (endüstriyel

yağ) ortamında beş farklı akım (8, 10, 12, 14, 16 A), vurum süresi (13, 26, 38, 51, 63 µs) ve vurum ara süresi (5, 6, 7, 8, 9 µs) ile sabit voltaj (55 V) değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, kriyojenik işlem uygulanan NiTi ŞHA'ların işlenmesinde takım aşınma oranının artış gösterdiği belirtilmiştir. Araştırmacılar bu durumu "kriyojenik ısı işlem uygulanan NiTi ŞHA'larda kristal yapının düzelmesi ve malzeme tanelerinin daha sıkı bir şekilde bağlanmış olması" şeklinde yorumlamışlardır. Akımın artmasıyla birlikte talaş kaldırma oranı ve takım aşınma oranının arttığını tespit etmişlerdir. Kriyojenik işlem uygulanmış malzemelerin vurum süresi ve vurum ara süresine bağlı olarak talaş kaldırma oranında iyileşme görüldüğü bununla birlikte vurum süresi, vurum ara süresi ve akım değerlerinin talaş kaldırma oranına kıyasla takım aşınması üzerinde daha düşük bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 3.7) [61].



Şekil 3.7. Kriyojenik işlem uygulanmış/uygulanmamış NiTi ŞHA'ların a) akım, b) vurum süresi, c) vurum ara süresi parametre değerlerinin talaş kaldırma ve elektrot aşınma oranına etkileri [61].

Ceritbinmez ve Kanca, EEİ ile işlemede işleme parametrelerinin elektrot aşınma oranı ve deney numunesi üzerinde oluşan kerf açısı ile yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında işleme parametreleri olarak üç farklı akım (6,25, 12,5, 25 A), vurum süresi (3, 6, 9 µs) ve vurum ara süresi (4, 6, 8 µs) deney numunesi olarak Krom-Molibden-Vanadyum takım çeliği (CrMoV) kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarını bakır elektrot vasıtasıyla dielektrik sıvı (Eralube Endüstriyel Yağ) içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda akım değerinin artmasıyla iş parçası ve elektrot arasında meydana gelen arklara (kıvılcım) bağlı olarak işleme süresinin azaldığını, ancak elektrot aşınma oranı, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kerf açısı değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Vurum süresi

değerinin azalmasıyla elektrot aşınma oranı ve kerf açısının artış gösterdiğini bildirmişlerdir [62].

Kulkarni ve ark., “NiTi ŞHA’ların tel erozyon ile işleme yöntemi kullanılarak işlenmesinde işleme parametrelerinin optimizasyonu” adlı çalışmalarında vurum süresi (105, 115, 125 μ s), vurum ara süresi (25, 40, 55 μ s) ve tel besleme (4, 6, 8 mm/dk) parametrelerinin talaş kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine etkilerini incelemişlerdir. Talaş kaldırma işlemlerini Taguchi L₉ ortogonal dizisi kullanılarak 0,25 mm çapında çinko kaplı pirinç elektrot vasıtasıyla deiyonize sıvı içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda maksimum talaş kaldırma oranının, minimum takım aşınma ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin; 115 μ s vurum süresi, 25 μ s vurum ara süresi ve 4 mm/dk tel besleme değerlerinde elde edildiğini belirtmişlerdir [52].

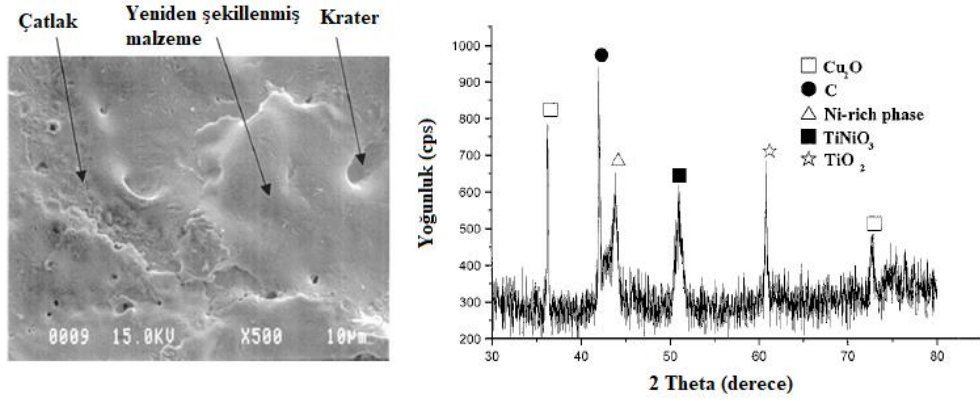
Reddy ve ark., Ni₄₈Ti₅₀Co₂ ŞHA’ların tel erozyon ile işleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminde işleme parametrelerinin optimizasyonu çalışmalarında maksimum talaş kaldırma oranı ve minimum ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini elde etmeyi amaçlamışlardır. Taguchi’nin L₉ ortogonal dizisi kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminde işleme parametrelerini üç farklı voltaj (40, 45, 50 V), vurum süresi (115, 120, 125 μ s) ve vurum ara süresi (30, 35, 40 μ s) olarak tayin etmişlerdir. Araştırmacılar deneysel çalışmalarını 0.25 mm çapında pirinç elektrot kullanılarak dielektrik sıvı (damıtılmış su) ortamında gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar maksimum talaş kaldırma oranı (10 0823 mm³/dk) ve minimum ortalama yüzey pürüzlülük değerinin (2,876 μ m); 125 μ s vurum süresi, 35 μ s vurum ara süresi ve 40 V voltaj değerlerinde elde edildiğini belirtmişlerdir [63].

Lin ve ark., “NiTi ŞHA’nın EEİ ile işleme özelliklerinin araştırılması” adlı çalışmalarında deney numunelerinin yüzey morfolojisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar Çizelge 3.7’de verilen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir [64].

Çizelge 3.7. Deneysel parametre değerleri [64].

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
Akım (A)	6	12	25	-	-	-
Vurum süresi (µs)	3	6	12	25	50	100
Vurum ara süresi (µs)	3	6	12	25	50	100
Voltaj (V)	50					
Elektrot	Bakır (Cu)					
Dielektrik sıvı	Kerosen (gaz yağı)					

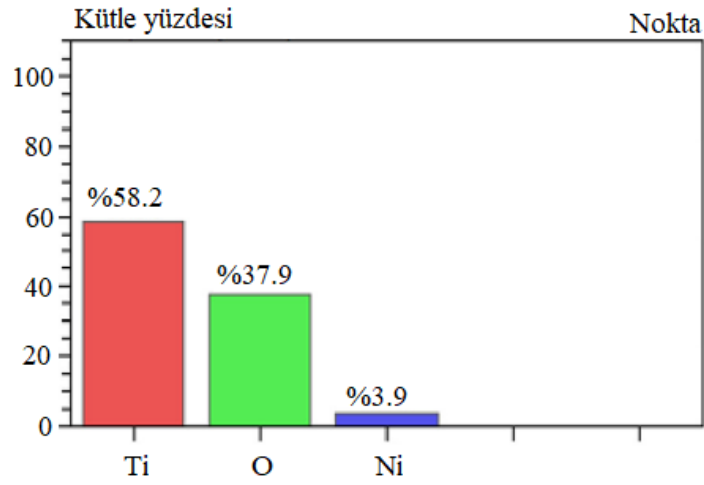
Deneysel numunesi olarak 150x80x5 mm ölçülerinde ve 800 °C sıcaklıkta vakumlu fırında 2 saat boyunca tavlama işlemi uygulanmış üç farklı (Ni₅₁Ti₄₉, Ni₅₀Ti₅₀ ve Ni₄₀Ti₅₀Cu₅₀) NiTi ŞHA'lar kullanmışlardır. NiTi ŞHA yüzeylerinin aktif faz yapıları X-Işını Difraktometresi (XRD) cihazı kullanılarak incelemişlerdir. (Şekil 3.8). Araştırmacılar Ni₅₁Ti₄₉, Ni₅₀Ti₅₀ ve Ni₄₀Ti₅₀Cu₅₀ ŞHA'ların yüzeyinde meydana gelen yeniden şekillenmiş malzeme, çatlak/çatlaklar ve krater/kraterler değişimlerini Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazlarından alınan görüntüler vasıtasıyla incelemişlerdir. Deney numune yüzeylerinin aktif faz yapılarına bakılarak; Bakır-Oksit (Cu₂O), Karbon (C) varlığını tespit etmişlerdir [64].



Şekil 3.8. Deney numunelerin SEM görüntüsü ve XRD sonuçları [64].

Jamaluddin ve ark., “Deiyonize sıvı ortamında NiTi alaşımın elektriksel deşarj kaplaması” isimli çalışmalarında, elektro erozyon ile kaplama yoluyla NiTi alaşım yüzeyi üzerinde titanyum oksit tabakasının geliştirilebilirliğini incelemişlerdir. NiTi alaşımının biyoyumluluğun iyileştirilmesi ve alaşım içerisindeki Ni iyonlarının insan vücuduna zararlı etkilerini minimuma indirmeyi amaçlamışlardır. Elektro erozyon ile kaplama işlemlerini, titanyum elektrot malzemesi ve dielektrik sıvı

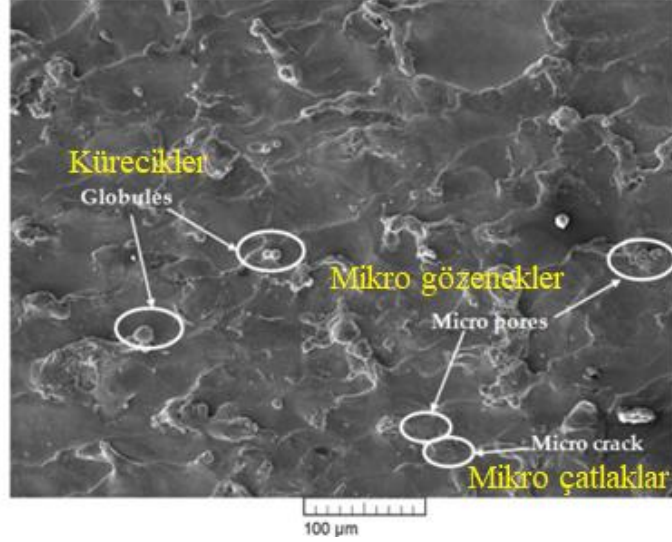
ortamında iki farklı polarite (-, +), voltaj (70, 160 V) ve erozyon derinliği (0,15, 0,30 mm) parametrelerinde gerçekleştirmişlerdir. Yüksek seviyedeki voltajın (160 V) NiTi alaşımın yüzeyinde titanyum oksit yapısını sağladığını belirlemişlerdir (Şekil 3.9). Araştırmacılar ayrıca, polarite ve voltajın ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etki gösterdiğini tespit etmişlerdir. Yüksek voltaj ile polarite etkileşimi sonucu kıvılcım enerjisinin artış gösterdiğini, bu durumun işlenen yüzeylerde derin ve geniş krater oluşumuna neden olduğunu aktarmışlardır [65].



Şekil 3.9. Yüzeyi kaplanmış NiTi alaşımın kimyasal kompozisyon verileri [65].

Chaudhari ve ark., “Tel erozyon ile işlenen ŞHA’ların yüzey analizi” isimli çalışmalarında, optimize edilmiş parametre değerlerinde tel erozyon ile işlenmiş NiTi numunelerin yüzey bütünlüğünü dijital mikroskop, SEM ve EDX analizleri ile incelemişlerdir. Araştırmacılar, optimize edilmiş (vurum süresi 65 μ s, vurum ara süresi 32 μ s ve akım 6 A) parametrelerde gerçekleştirilen deneyler sonucunda, globüllerin (küreciklerin) boyutunda ve sayısında bir azalma ile birlikte hatasız bir yüzey oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 3.10). Elde edilen sonuçlar neticesinde, optimum ortalama yüzey pürüzlülük değerinin elde edilmesinde etkili olan en önemli parametrenin uygun deşarj enerjisi seçmek olduğunu aktarmışlardır. Yüksek deşarj enerjisinin işleme sırasında tel (molibden) ile temas eden deney numunesi yüzeylerinde yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında, deney numunesi yüzeyinde tel malzemeye ait kalıntıların olmadığını tespit etmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmalar sonucunda, NiTi alaşımların işlenmesi için

optimize edilmiş parametrelerinin yüzey bütünlüğü açısından olumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [66].

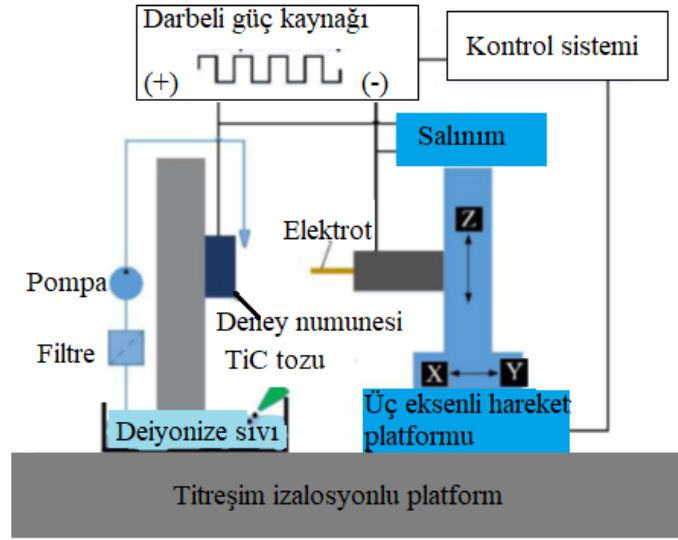


Şekil 3.10. Optimize edilmiş parametrelerde tel erozyon ile işlenmiş yüzeyin SEM görüntüsü [66].

Kulkarni ve ark., süperelastik NiTi alaşımın tel erozyon ile işlenmesinde proses parametrelerinin analizi çalışmalarında, sabit akım (12 A), voltaj (11 V), tel ilerleme değeri (6 m/dak) ve üç farklı vurum süresi (105, 115, 125 µs), vurum ara süresi (25, 40, 55 µs), kıvılcım boşluğu set gerilimi (20, 40, 60 V) parametrelerinin, yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. ANOVA ile geliştirilen matematiksel model kullanılarak deney parametrelerinin etkilerini ve etkileşimlerini analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmaya ait bulgular neticesinde, vurum süresi ve kıvılcım boşluğu set geriliminin, talaş kaldırma oranını en üst düzeye çıkarmada ve yüzey pürüzlülüğünü en aza indirmede baskın faktörler olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, vurum süresindeki artışlara bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün artış gösterdiğini, vurum ara süresi ve kıvılcım boşluğu set gerilimi değerlerindeki artışa bağlı olarak ise yüzey pürüzlülüğünün düşüş gösterdiğini bildirmişlerdir. Ayrıca, vurum süresindeki artışların talaş kaldırma oranını arttırdığını belirten araştırmacılar, kıvılcım boşluğu set gerilimi değerindeki ilk artışların (40 V'a kadar) talaş kaldırma oranını arttırdığını, ancak 60 V'de talaş kaldırma oranının azaldığını tespit etmişlerdir. Proses parametreleri vurum süresi ve kıvılcım boşluğu set gerilimi, esas olarak yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı

performans özelliklerini etkilerken, vurum ara süresinin performans kriterleri üzerinde ihmal edilebilir bir etkisinin olduğunu bildirmişlerdir [67].

Zhu ve ark., NiTi ŞHA'ların Titanyum-Karbür (TiC) tozu konsantrasyonu kullanılarak mikro EEİ ile işlenmelerinde yüzey modifikasyon özellikleri çalışmalarında, insan vücudunda alerjiye ve zehirlenmeye neden olabilecek korozyon oluşumlarını incelemiştir. Araştırmacılar, EEİ ile işleme parametreleri ve TiC tozu konsantrasyonunun NiTi ŞHA'nın işleme ve yüzey özellikleri üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. Şekil 3.11'de yer alan görsel ile deney prosedür şemasını paylaşan araştırmacılar, talaş kaldırma deneylerini sabit boşluk derinliği (100 mm), TiC partikülleri (2 µm), deiyonize sıvı ve pirinç elektrot kullanılarak, dört farklı voltaj (60, 80, 100, 120 V), vurum süresi (1, 4, 7, 10 µs) ve beş farklı konsantrasyon (0, 3, 5, 7, 10 g/L) değerlerinde gerçekleştirmişlerdir. Vurum süresinin artmasıyla talaş kaldırma oranının, yüzey pürüzlülüğünün ve yüzeyde işlem sonrası oluşan tabaka kalınlığının artış gösterdiğini gözlemlemiştir. Araştırmacılar, TiC tozu ilavesinin elektro-deşarj frekansını ve talaş kaldırma oranını artırmada, yüzey pürüzlülüğünü azaltmada olumlu bir etkisinin olduğunu ve 5 g/L'lik bir karışık toz konsantrasyonunda maksimum talaş kaldırma oranı ve minimum yüzey pürüzlülüğünün meydana geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, talaş kaldırma sonrası yüzeyde oluşan yeni katmanın, metalurjik bağlanma nedeniyle iyi bir adezyona ve yüksek sertliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. XRD analizleri ile işlenmiş yüzeyin Bakır-Dioksit (CuO₂), Titanyum-Dioksit (TiO₂) ve TiC fazlarını içerdiğini ve işleme sonrası yüzey mikrosertliğinin 258,5 HV değerinden 438,7 HV değerine yükselmesiyle biyomedikal ortodontik uygulamalarda aşınma direnci için faydalı olabilecek sonuçların elde edildiğini belirtmişlerdir [68].



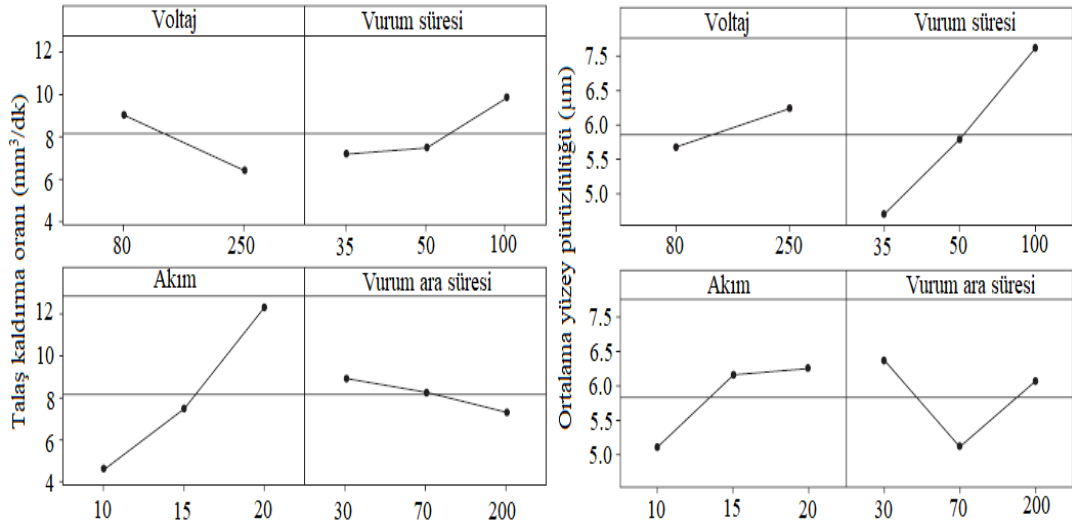
Şekil 3.11 Toz karışımı EEİ ile işlemenin deneysel kurulumuna ait şematik görünüm [68].

Sharma ve Gupta, “Biyomedikal uygulamalar için NiTi ŞHA’ların tel erozyon ile işlenebilirlikleri” başlıklı çalışmalarında, $Ni_{55.8}Ti_{44.2}$ alaşımların işlenebilirliğini incelemişlerdir. Gerçekleştirilen talaş kaldırma deneyleri ile maksimum yüzey bütünlüğü ve yüksek talaş kaldırma oranını elde etmeyi amaçlamışlardır. Deneysel çalışmalarında, Taguchi deney tasarımında kullanılan L_{16} ortogonal diziyi tercih etmişlerdir. Araştırmacılar, talaş kaldırma deneylerini dört farklı vurum süresi (0,35, 0,5, 0,85, 1 μs), vurum ara süresi (9, 11,5, 15, 24 μs) kıvılcım boşluğu set gerilimi (20, 30, 40, 50 V) ve tel ilerleme (3, 6, 9, 12 m/dak) değerinde, deiyonize su ortamında, pirinç tel elektrot ($\varnothing 0.25$) kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Vurum ara süresinin düşük değeri ile kıvılcım boşluğu set gerilimi, vurum süresi ve tel ilerleme değerlerinin yüksek değeri alınarak gerçekleştirilen talaş kaldırma deneyleri sonrası kesme oranının artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Kesme oranının ağırlıklı olarak vurum süresi ve vurum ara süresinden önemli ölçüde etkilendiğini bildirmişlerdir. Optimum kesme oranının (2,91 mm/dak), vurum süresinin 1 μs , vurum ara süresinin 9 μs , tel ilerleme değerinin 12 m/dak ve kıvılcım boşluğu set gerilimi değerinin 50 V alındığı talaş kaldırma işlemi sonucunda elde edildiğini tespit etmişlerdir. Tel erozyon ile işlemede kullanmış oldukları parametre değerleri ve gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları ile NiTi ŞHA’ların işlenmesi için kesme oranının ve dolayısıyla üretkenliğin arttığını belirtmişlerdir [69].

Liu ve Guo, “NiTi ŞHA’ların tel erozyon ile işlenmesinde kırıma ve ana kesme modlarında işlem kapasitesi” adlı çalışmalarında, NiTi ŞHA’ların tel erozyon ile düşük, normal ve yüksek talaş kaldırma miktarlarında işlenmesinde, iş parçasının ortalama yüzey pürüzlülüğü, yüzey tapolojisi, mikroyapısı ve difüzyon oluşumuna etkileri incelemiştirler. Talaş kaldırma deneylerinde, pirinç tel elektrot ($\text{Ø}0.25$ mm) ve iki farklı dielektrik sıvı (CH sınıfı motor yağı ve dielektrik su) kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarda, talaş kaldırma miktarının artmasıyla deşarj enerjisinin artış gösterdiğini gözlemlemiştirler. Araştırmacılar, yüzey tapolojisini incelediklerinde, nispeten yüksek deşarj enerjisine sahip yüksek talaş kaldırma modunda, talaş kaldırılan yüzeyden kopan malzemelerin dielektriğe sıçraması ve hızla soğuması sonrasında deney numunesi yüzeyinde yeniden katılaşma olduğunu, işlenmiş yüzey üzerinde ince küresel artıkların biriktiğini ve mikro çatlakların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yüksek talaş kaldırma modunda gözlemlenen mikro çatlakların normal talaş kaldırma modunda CH sınıfı motor yağının kullanılmasıyla en aza indirildiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu durumun, dielektrik sudaki yüksek soğutma özelliğinden ve oluşan yüksek artık gerilmelerden kaynaklandığını bildirmişlerdir. Düşük talaş kaldırma modunda, erimiş malzemenin dielektriğe tamamen püskürtülecek kadar yüksek basınç değeri olmadığı için yüzeylerde küresel artıklar çok az görüldüğünü aktarmışlardır. Talaş kaldırılan yüzeyler incelendiğinde, yüksek talaş kaldırma modunda yüksek deşarj enerjisinden dolayı ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin diğer kesme yöntemlerine oranla fazla olduğunu gözlemlemiştirler. Çalışmalarında, dielektrik su kullanılarak yüksek talaş kaldırma modunda ($2,45 \mu\text{m}$), normal talaş kaldırma modunda ($3,69 \mu\text{m}$) ortalama yüzey pürüzlülük değerinin ölçüldüğünü aktarmışlardır. Araştırmacılar bu durumun, mikro çatlakların ortadan kaldırılamamasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [70].

Daneshmand ve ark., “NiTi ŞHA’nın EEİ ile işlenmesinde işleme parametrelerinin optimizasyonu” adlı çalışmalarında; voltaj, akım, vurum süresi ve vurum ara süresi değerlerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranına etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar ilgili parametreler doğrultusunda, maksimum talaş kaldırma oranı ve minimum ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini elde etmeyi amaçlamışlardır. Talaş kaldırma işlemleri, Taguchi’nin L_9 ortogonal dizisine göre belirlenen çeşitli parametrelerde, pirinç elektrotlar vasıtasıyla deiyonize sıvı

içerisinde gerçekleştirmişlerdir. Deney numunesi olarak Ni₅₅Ti₄₅ ŞHA kullanan araştırmacılar, farklı akım (10, 15, 20 A), vurum süresi (35, 50, 100 µs), vurum ara süresi (30, 70, 200 µs) ve voltaj (80, 250 V) değerlerinde talaş kaldırmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda araştırmacılar, talaş kaldırma oranının akım değeri (10 → 20 A) artması ile %100, vurum süresi (35 → 100 µs) değeri artmasıyla ise %48 artış gösterdiğini tespit etmişlerdir (Şekil 3.12). Voltaj (80 → 250 V) ve vurum ara süresi (30 → 200 µs) değerindeki artışlar sonucunda ise talaş kaldırma oranının %30 oranında düşüş gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin akım (10 → 20 A) artması ile %30, vurum süresinin (35 → 100 µs) artmasıyla %50 ve voltaj değerinin (80 → 250 V) artmasıyla %19 oranında artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Taguchi dizisine göre talaş kaldırma deneyleri sonucunda, en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü (4,1 µm) ve en yüksek talaş kaldırma oranının (11.4 mm³/dk); akım 10 A, vurum süresi 100 µs, vurum ara süresi 200 µs ve voltaj 250 V olarak belirlenen parametrelerde gerçekleştiğini gözlemlenmiştir [71].



Şekil 3.12. Voltaj, akım, vurum süresi ve vurum ara süresi değerlerinin talaş kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine etkisi [71].

3.2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

NiTi ŞHA'ların üstün mekanik özellikleri (süperelastik ve şekil hafıza etkisi) ve fiziksel özellikleri nedeniyle geleneksel (modern olmayan) imalat yöntemleri ile işlenmesi oldukça zordur. Bu nedenle NiTi ŞHA'ların işlenmesinde geleneksel olmayan (modern) imalat yöntemleri tercih edilmektedir. Bu bağlamda NiTi ŞHA'ların EEİ ile işleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen işlenebilirlik çalışmaları incelendiğinde akım, voltaj, vurum süresi, vurum ara süresi, frekans ve kıvılcım boşluğu set gerilimi parametre değerlerinin talaş kaldırma oranı, takım aşınma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine etkilerinin önemli olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde yer alan işlenebilirlik ile alakalı bilimsel çalışmalar; maksimum talaş kaldırma oranı, minimum takım aşınma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin tespit edilmesine yönelik olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar genel olarak işlenebilirlik özelliğini iyileştirmeye yönelik olmuştur. Bu çalışmada, NiTi ŞHA'ların EEİ ile işleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminde akım, voltaj ve vurum süresi parametre değerlerinin talaş kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine etkileri incelenmiştir. Maksimum talaş kaldırma oranı değeri ve minimum ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin hangi işleme parametre değerlerinde gerçekleştiğinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca talaş kaldırma işlemi sonucunda, elektrot çapı ile deney numunesi üzerindeki delik çaplarının kıyaslandırılması yapılmıştır. Deneysel çalışmalar için uygun parametre değerleri, literatürde yer alan çalışmalar göz önünde bulundurularak tespit edilmiştir. NiTi ŞHA'lar üç farklı elektrot ile dielektrik sıvı içerisinde talaş kaldırma işlemine tabi tutulmuştur. Talaş kaldırma işlemi sonrası deney numulerinin mikroskobik, SEM ve EDX görüntüleri alınarak mikro yapısal incelemeleri ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırma işlemi sonrası en ideal işleme parametre değeri Minitab 18.0 paket programı kullanılarak Taguchi yöntemi ile tespit edilmiştir.

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, NiTi ŞHA EEİ tezgahı kullanılarak üç farklı akım, vurum süresi ve elektrot ile sabit voltaj ve vurum ara süresi parametre değerlerinde talaş kaldırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonrası NiTi ŞHA'ların işlenebilirlikleri (talaş kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük) ve işlenmeleri sonrası yüzey yapıları incelenmiştir. Talaş kaldırma deneyleri dielektrik sıvı (dielektrikum 358) ortamında gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırma deneyleri sonrası elektrot çapı ile deney numunesi üzerindeki delik çaplarının kıyaslandırılması yapılmıştır. Deney numulerinin mikroskobik, SEM ve EDX görüntüleri alınarak mikro yapısal incelemeleri ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalar sonucunda optimum işleme parametreleri Minitab 18.0 paket program kullanılarak belirlenmiştir.

4.1. ELEKTRO EROZYON TEZGAHI

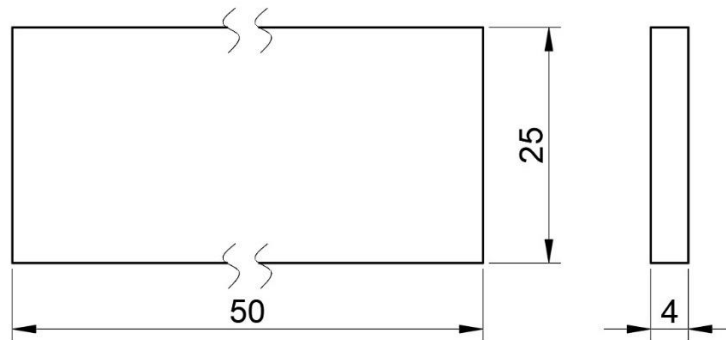
Talaş kaldırma işlemleri, "EEİ-KING ZNC K-3200" marka EEİ tezgahında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. EEI-KING ZNC K-3200 EEI Tezgahı fotoğraf görüntüsü.

4.2. DENEY NUMUNESİ

Deneysel çalışmalarda; otomotiv, havacılık, uzay ve tıp gibi çeşitli alanlarda sıklıkla tercih edilen NiTi ŞHA'lar deney numunesi (100x25x4 mm) olarak kullanılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. NiTi ŞHA deney numunesi teknik resim görüntüsü.

NiTi ŞHA deney numunelerinin içerisinde bulunan Ni ve Ti oranları Çizelge 4.1'de, termal ve elastik özellikleri Çizelge 4.2'de ve mekanik özellikleri Çizelge 4.3'de verilmiştir [72].

Çizelge 4.1. NiTi ŞHA malzemesinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça) [72].

Ni	C	Co	Cu	Cr	H	Fe	Nb	N+O	Ti
55,8	0,038	0,005	0,006	0,004	0,001	0,0012	0,005	0,041	44,09

Çizelge 4.2. NiTi ŞHA'nın termal ve elastik özellikleri [72].

	NiTi (Östanit faz yapı)	NiTi (Martenzit faz yapı)
Young modülü (Gpa)	75	41
Poison oranı	0,3	0,3
Isıl iletkenlik (W/m.K)	18	8,6
Termal genleşme katsayısı	11×10^{-6}	6.6×10^{-6}
Isı kapasitesi (J/g.°C)	0,837	0,320

Çizelge 4.3. NiTi ŞHA'nın mekanik özellikleri [72].

Akma gerilmesi (MPa)	Çekme gerilmesi (Mpa)	Uzama (%)	Sertlik (HRC)
210	783	16,5	26,5

4.3. İŞLEME PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE ÖN DENEYLERİN YAPILMASI

NiTi ŞHA numunelerin EEİ ile işlenmeleri üzerine gerçekleştirilen literatür araştırmaları sonucunda akım ve vurum süresi parametre değerlerinin talaş kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine etki eden en etkili parametre değerleri olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan literatür araştırması bilgileri dahilinde NiTi ŞHA numunelerinin EEİ ile işlenebilmelerinde işleme parametrelerinin belirlenmesi amacıyla ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Üç farklı elektrot kullanılarak yapılan ön deney çalışmalarında işleme derinliği 1 mm alınmıştır. Ön deneyler sonucunda, NiTi ŞHA'ların üç farklı akım (6, 12, 18 A), vurum süresi (200, 400, 600 µs) ve elektrot (E₁, E₂, E₃) ile 0,2 mm ilerleme derinliğinde işlenmesine karar verilmiştir. Deney parametrelerine ait bilgiler Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Talaş kaldırma işlemlerinde kullanılan parametre değerleri.

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Akım (A)	6	12	18
Vurum süresi (µs)	200	400	600

Çizelge 4.4 (devam ediyor).

Vurum ara süresi (μs)	50
Voltaj (V)	3
İlerleme derinliği (mm)	0,2
Dielektrik sıvı basıncı (kg/cm^2)	1,75
Elektrot	Bakır (E_1), Grafit (E_2), Tungsten-Bakır (E_3)
Dielektrik sıvı	Dielektrikum 358

4.4. İŞLENEBİLİRLİK DENEYLERİ

4.4.1. Elektrot Seçimi

Talaş kaldırma işlemlerinde $\text{Ø}12$ mm ölçülerine sahip üç farklı elektrot (E_1 , E_2 , E_3) kullanılmıştır (Şekil 4.3). Elektrik iletkenliği yüksek ve kolay şekillendirilebilmesi nedeniyle E_1 , yüzey kalitesinde olumlu sonuçlar alınabildiğinden E_2 ve düşük takım aşınması nedeniyle E_3 elektrotlar çalışmada tercih edilmiştir [1, 73].



Şekil 4.3. NiTi ŞHA'ların EEİ ile işlenmesinde kullanılan elektrotların (E_1 , E_2 , E_3) fotoğraf görüntüsü.

4.5. DENEY PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Literatür araştırmaları ve ön deneyler sonucuna göre belirlenen deney parametreleri Çizelge 4.5'de gösterilmektedir. Taguchi L_{27} ortogonal dizi kullanılarak 27 farklı deney yapılmıştır.

Çizelge 4.5. Deney parametreleri.

Sıra no	Elektrot			Akım (A)	Vurum süresi (µs)
	Cu	C	WCu		
1	E ₁	E ₂	E ₃	6	200
2	E ₁	E ₂	E ₃	6	400
3	E ₁	E ₂	E ₃	6	600
4	E ₁	E ₂	E ₃	12	200
5	E ₁	E ₂	E ₃	12	400
6	E ₁	E ₂	E ₃	12	600
7	E ₁	E ₂	E ₃	18	200
8	E ₁	E ₂	E ₃	18	400
9	E ₁	E ₂	E ₃	18	600

4.5.1. Taguchi Deneysel Tasarım Yaklaşımı

Bu çalışmada, deney tasarımı için Taguchi L₂₇ ortogonal dizisi yöntemi ve deneysel çalışma sonuçlarını analiz edebilmek için S/N (sinyal/gürültü) oranı kullanılmıştır. S “sinyal” faktörü, N “gürültü” faktörüne karşılık gelmektedir. Sinyal faktörü alınan gerçek değer, gürültü faktörü deney tasarıma girmeyen ama deney sonucuna etki eden faktörleri belirtmektedir [74, 75]. Taguchi deney tasarım metodunda S/N oranlarının hesaplanmasında ortalama yüzey pürüzlülüğü ve delik çap ölçümü değerleri için; “en küçük daha iyidir” (Eşitlik 4.1), talaş kaldırma oranı değeri için “en büyük daha iyidir” (Eşitlik 4.2) deney yaklaşımı kullanılmıştır [76, 77].

$$\text{En küçük daha iyidir: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4.1)$$

$$\text{En büyük daha iyidir: } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4.2)$$

4.6. TALAŞ KALDIRMA ORANI

Deneysel çalışmalar sonrası talaş kaldırma oranı, işlem sırasında dakikadaki malzeme aşınma farkı oranına göre hesaplanmıştır. Talaş kaldırma işlemi öncesi deney numunesinin ağırlığı Precisa LS 320A SCS Analitik terazi cihazı (Hassasiyet: 320gr/0,0001gr) ile ölçülmüştür (Şekil 4.4) Talaş kaldırma işlemi sonrası deney

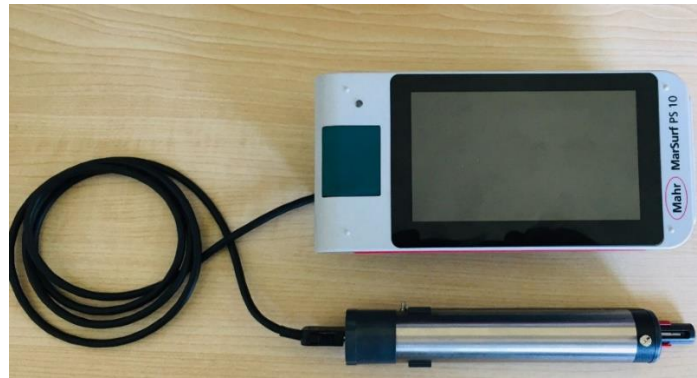
numunesi ağırlığı tekrardan ölçülerek malzeme aşınma farkı hesaplanmıştır. Talaş kaldırma işleminin süresi ve bunun sonucunda talaş kaldırma oranının hesaplanması (malzeme aşınma farkı/dakika) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. Precisa LS 320A SCS Analitik terazi cihazı fotoğraf görüntüsü.

4.7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ

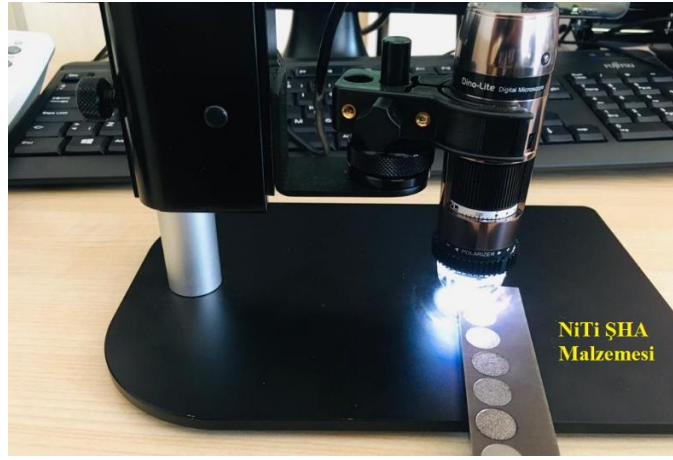
Talaş kaldırma deneyleri sonrasında numuneler üzerinde ortalama yüzey pürüzlülük ölçümleri DIN EN ISO 13565-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri MAHR-MarSurf PS 10 ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 4.5). Her bir delik için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 4 ayrı bölgeden (Ra1, Ra2, Ra3, Ra4) ölçülerek aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



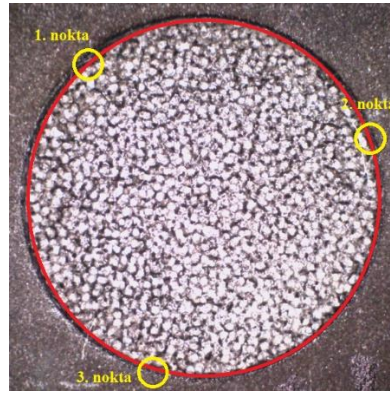
Şekil 4.5. MAHR-MarSURF PS 10 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı fotoğraf görüntüsü.

4.8. DELİK ÇAP ÖLÇÜMÜ

NiTi ŞHA numunelerde talaş kaldırma deneyleri sonrasında delik çaplarının ölçümü Dino-Lite Digital mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6). Delik çap ölçümü, üç noktadan geçecek şekilde bir daire çizilerek üç farklı ölçüm gerçekleştirilmiş olup ortalamaları delik çapı olarak tayin edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.6. Mikroskop ile delik çapı ölçümünün genel görüntüsü.



Şekil 4.7. Delik çap ölçümü gösterimi.

4.9. MİKRO YAPI GÖRÜNTÜLERİ

EEİ ile işleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma deneyleri sonrası delik yüzeylerinin mikro yapı görüntüleri Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka

taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Carl Zeiss Ultra Gemini Fesem marka SEM cihazı genel görüntüsü.

4.10. ENERJİ DAĞILIMLI SPEKTROMETRE

EEİ kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma operasyonları sonrasında NiTi ŞHA iş parçasının işlem görmüş yüzeylerindeki element tanımlamaları Carl Zeiss Ultra Plus Fesem marka enerji dağılımlı spektroskopi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX) cihazı kullanılarak analiz edilmiştir.

4.11. VARYANS (ANOVA) ANALİZİ

EEİ kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma operasyonları sonrası işleme parametrelerinin değişken faktörler üzerindeki etki derecelerini belirlemek için varyans (ANOVA) analizi uygulanmıştır. Analiz, % 5 anlamlılık seviyesi ve % 95 güvenilirlik seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Faktörlerin etki derecelerini belirlemek ve etki derecelerinin sıralamasını tayin etmek için Minitab 18 paket programı kullanılmıştır.

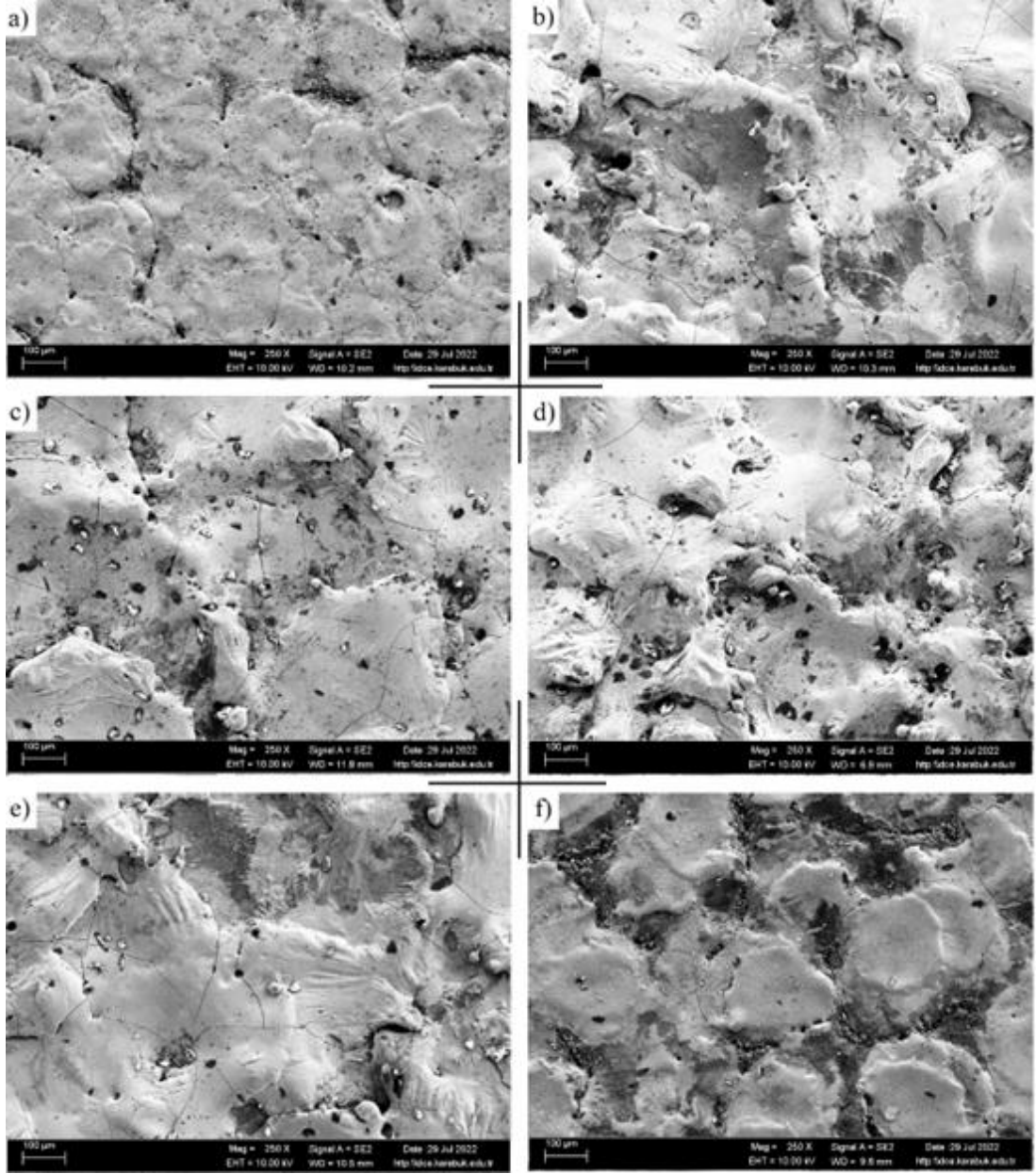
BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, NiTi ŞHA EEİ tezgahında işlenebilirliği araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar üç farklı elektrot (E_1 , E_2 , E_3), akım (6, 12, 18 A), vurum süresi (200, 400, 600 μ s) ile sabit voltaj (3 V) ve vurum ara süresi (50 μ s) parametre değerlerinde dielektrik sıvı (dielektrikum 358) ortamında gerçekleştirilmiştir. Literatür araştırmaları ve ön deneyler sonucuna göre belirlenen deney parametreleri (Bkz. Çizelge 4.5) gösterilmiştir.

5.1. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU İLE MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

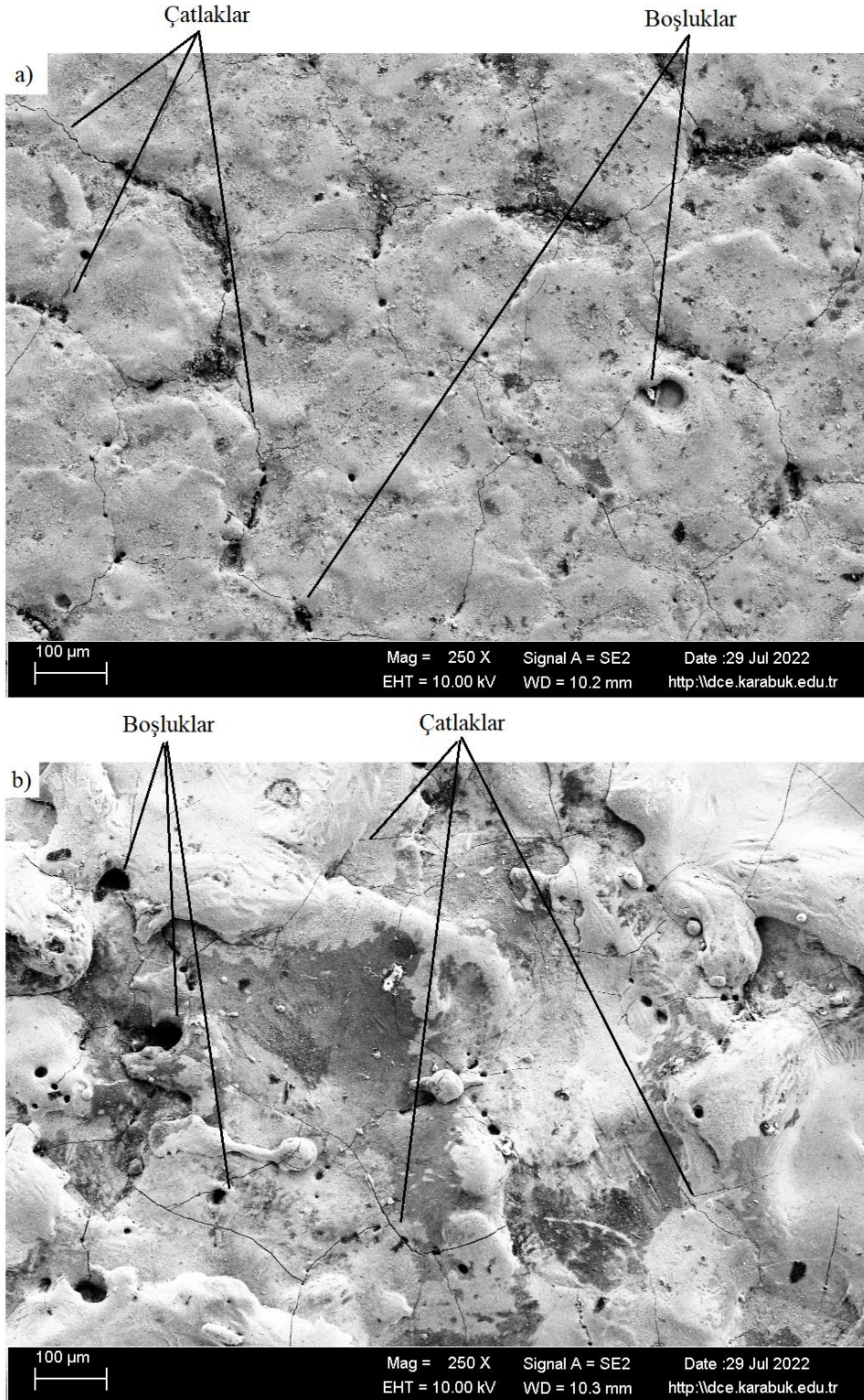
NiTi ŞHA deney numunelerinin EEİ tezgahında gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemleri sonrası mikro yapı görüntüleri ve yapı içerisinde gözeneklilik oluşumlarının varlığı SEM cihazı ile görüntülenmiştir. Üç farklı elektrot vasıtasıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonucunda deney numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerlerine ait veriler Çizelge 5.4'te verilmiştir. Veriler incelendiğinde, E_1 , E_2 ve E_3 elektrotları kullanılarak işlenen yüzeylerdeki en düşük ve en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü oluşumları belirlenmiş ve bu yüzeylere ait SEM görüntüleri Şekil 5.1'de verilmiştir. Şekil 5.1'de yer alan SEM görüntüleri Çizelge 5.4'teki verileri doğrular nitelikte olup üç farklı elektrodun kullanımı ile oluşan yüzey yapılarında belirgin bir şekilde farklılık olduğu görülmektedir. Bu nedenle, E_1 , E_2 ve E_3 elektrotları ile elde edilen yüzeylere ait SEM görüntüleri çatlak ve boşluk gibi oluşumların varlığı bakımından ilerleyen bölümlerde sırasıyla ele alınmıştır.



Şekil 5.1. NiTi ŞHA'ların; E₁ elektrot kullanılarak (a) en düşük R_a ve (b) en yüksek R_a, E₂ elektrot kullanılarak (c) en düşük R_a ve (d) en yüksek R_a ve E₃ elektrot kullanılarak (e) en düşük R_a ve (f) en yüksek R_a oluşumlarına ait 250x büyütme SEM görüntüleri.

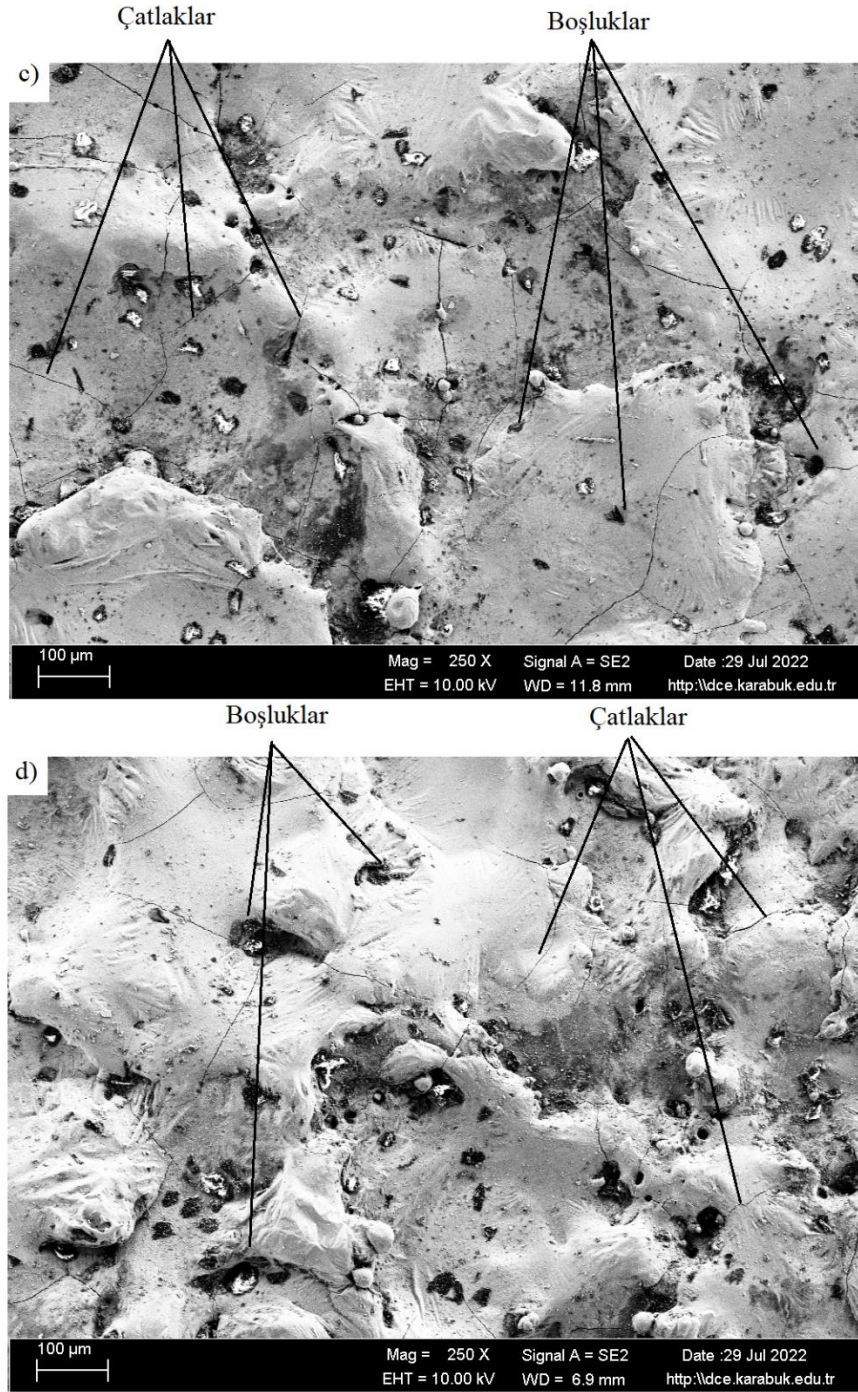
Şekil 5.1'de deney numunelerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde (250x büyütme) işlenmiş yüzeylerin üzerinde çatlaklar, boşluklar ve kraterler meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun deney numunesi ile elektrot arasında meydana gelen ısının ve oluşan kıvılcımlara (ark) bağlı olduğu bilinmektedir [59, 78]. E₁ elektrot vasıtasıyla, farklı akım (6 ve 12 A) ve 200 µs vurum süresi değerlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda oluşan SEM görüntüleri incelendiğinde

(Şekil 5.2); akım değerinin artmasıyla oluşan krater derinliğinin arttığı görülmüştür [79].

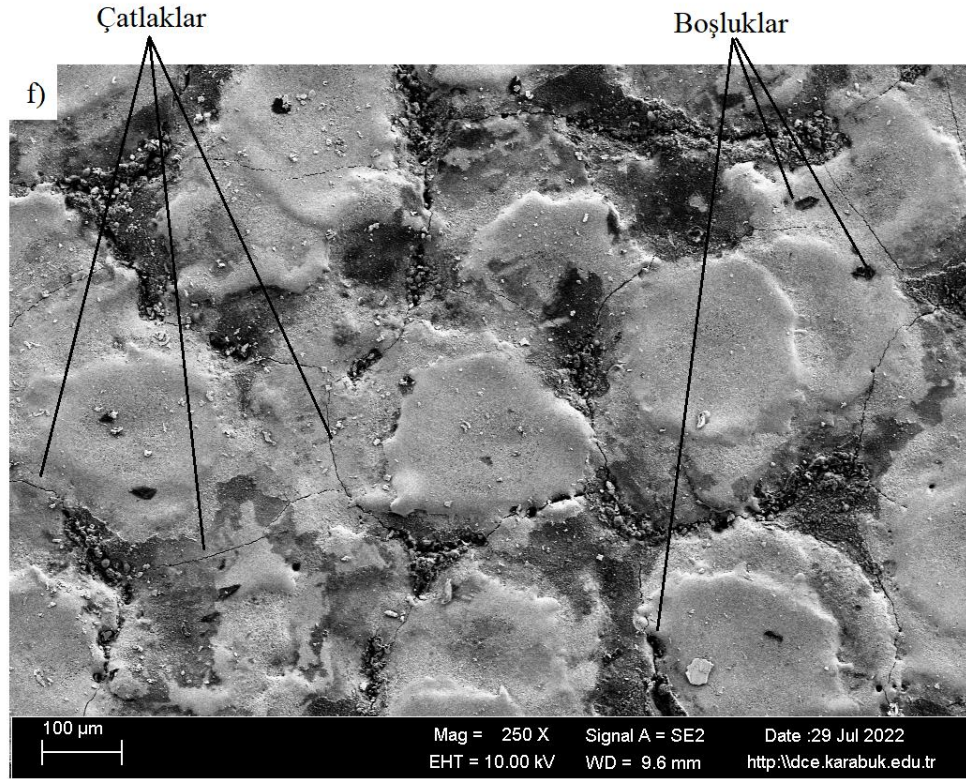
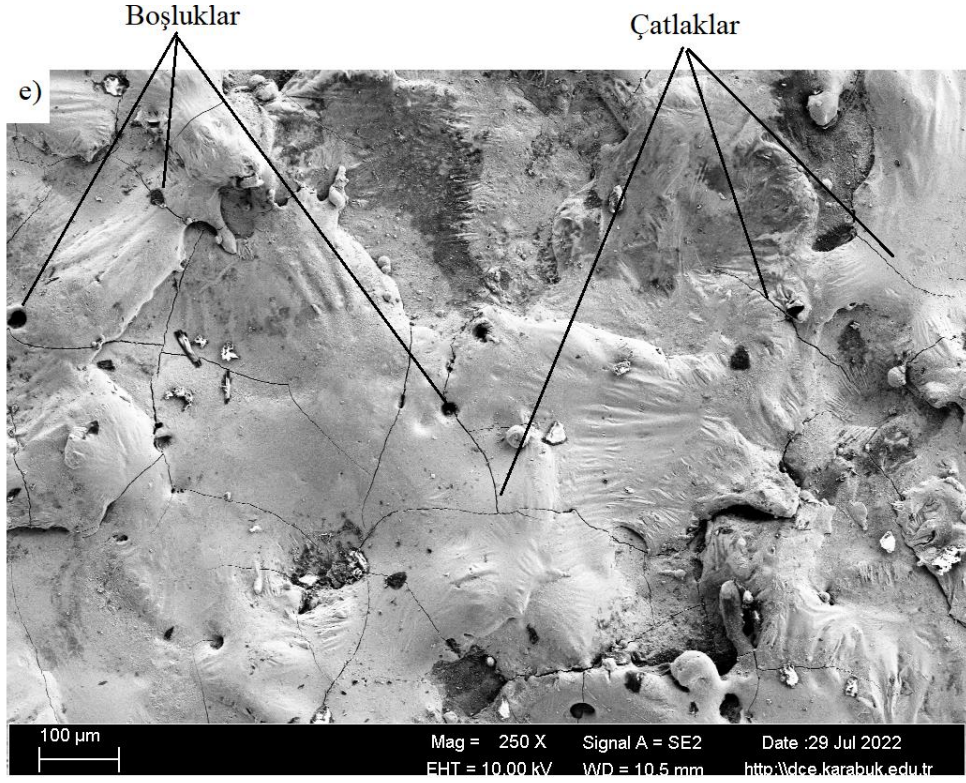


Şekil 5.2. NiTi ŞHA numunesinin E₁ elektrot, 200 µs vurum süresi, (a) akım 6 A ve ve (b) akım 12 A değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 250x büyütme SEM görüntüleri.

Ayrıca E₂ ve E₃ elektrotlar ile gerçekleştirilen deney çalışmalarında benzer bir yüzey yapısının var olduğu, akım değerinin artmasıyla krater derinliğinin arttığı tespit edilmiştir. Şekil 5.3'te E₂ ve Şekil 5.4'te E₃ elektrotlar ile yapılan talaş kaldırma işlemleri neticesinde SEM görüntüleri verilmiştir.



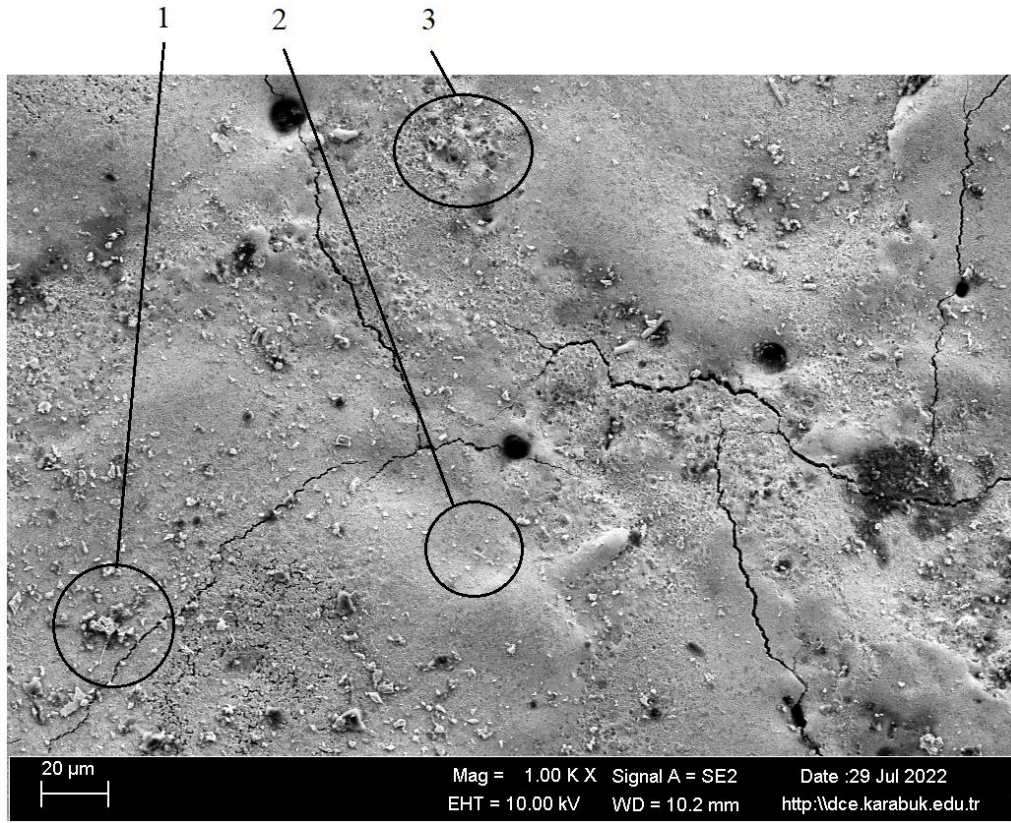
Şekil 5.3. NiTi ŞHA numunesinin E₂ elektrot, 200 µs vurum süresi, (c) akım 6 A ve (d) akım 12 A değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 250x büyütme SEM görüntüleri.



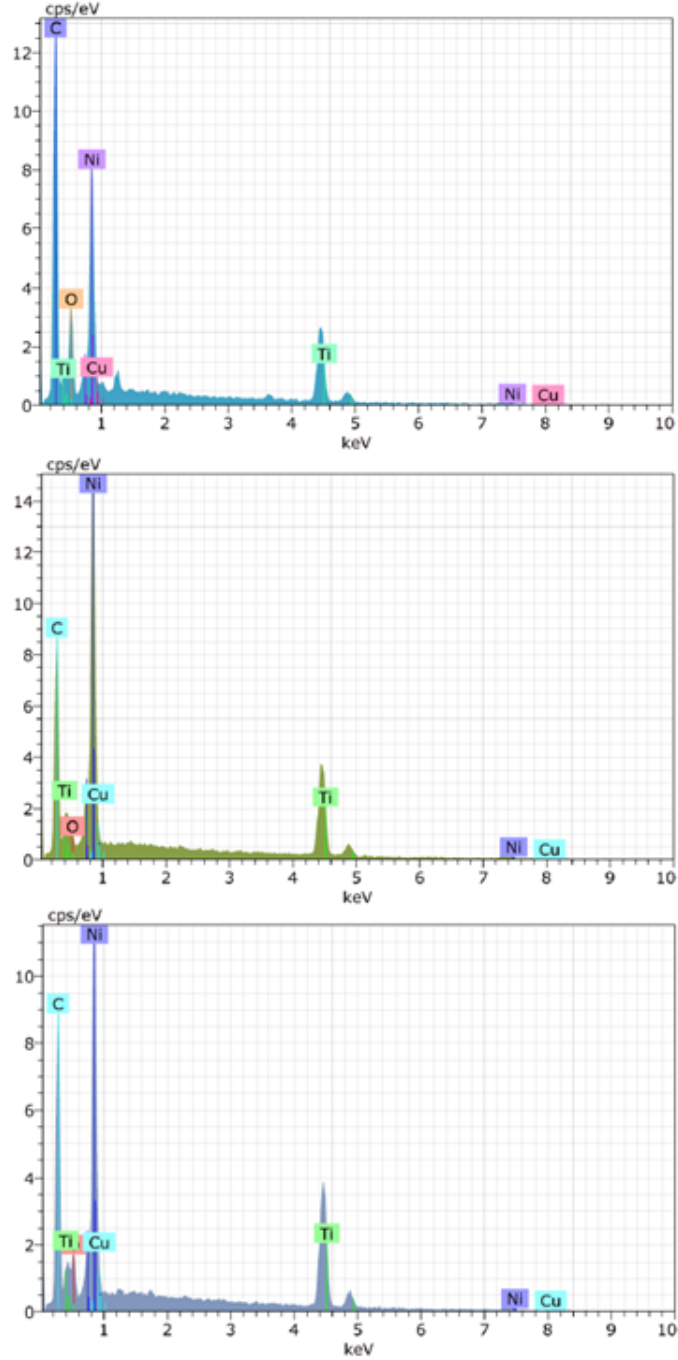
Şekil 5.4. NiTi ŞHA numunesinin E₃ elektrot, 200 μs vurum süresi, (e) akım 6 A ve ve (f) akım 12 A değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 250x büyütme SEM görüntüleri.

5.2. ENERJİ DAĞILIM SPEKTROSKOPİSİ KULLANILARAK ELEMENT TANIMLAMA ANALİZİ

NiTi ŞHA'ların EEİ ile talaş kaldırma işlemleri sonrası EDX analizi yapılarak deney numunelerine ait yüzeylerde meydana gelen elementel seviyedeki farklılıkların/değişimlerin ve yüzeyde mevcut olan elementlerin tespit edilmesi sağlanmıştır. Talaş kaldırma sırasında elektrottan deney numunesine element geçişinin hangi düzeyde gerçekleştiğinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 5.5'te verilen SEM görüntüsünde E_1 elektrot ile akım (6 A) ve vuruş süresi (200 μ s) parametre değerlerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma operasyonu sonrası yüzey yapısı görülmektedir. Görsel üzerinde tanımlanan birinci bölge incelendiğinde, elektrottan kopan Cu elementinin sıcaklığın etkisiyle NiTi ŞHA numune yüzeyine yapıştığı gözlemlenmiştir. Birinci bölgeden alınan EDX verileri incelendiğinde, yüzeyde E_1 oluşumunun varlığı tespit edilmiştir (Şekil 5.6). İkinci bölge EDX incelemesinde ise Ti oranında önemli miktarda düşüşün gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum, yüzeyde TiC yapının bölgesel olarak oluşma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Üçüncü bölgede, üst kısımda aktarılan birinci ve ikinci bölümün birlikte oluşturduğu bir yapı görünümü göze çarpmaktadır. Ti ve Ni oranlarının azaldığı ve yüzeyde E_2 oluşumunun arttığı bu bölgede, elektrottan ayrılıp yüzeye yapışan E_1 varlığı gözlemlenmemiştir.



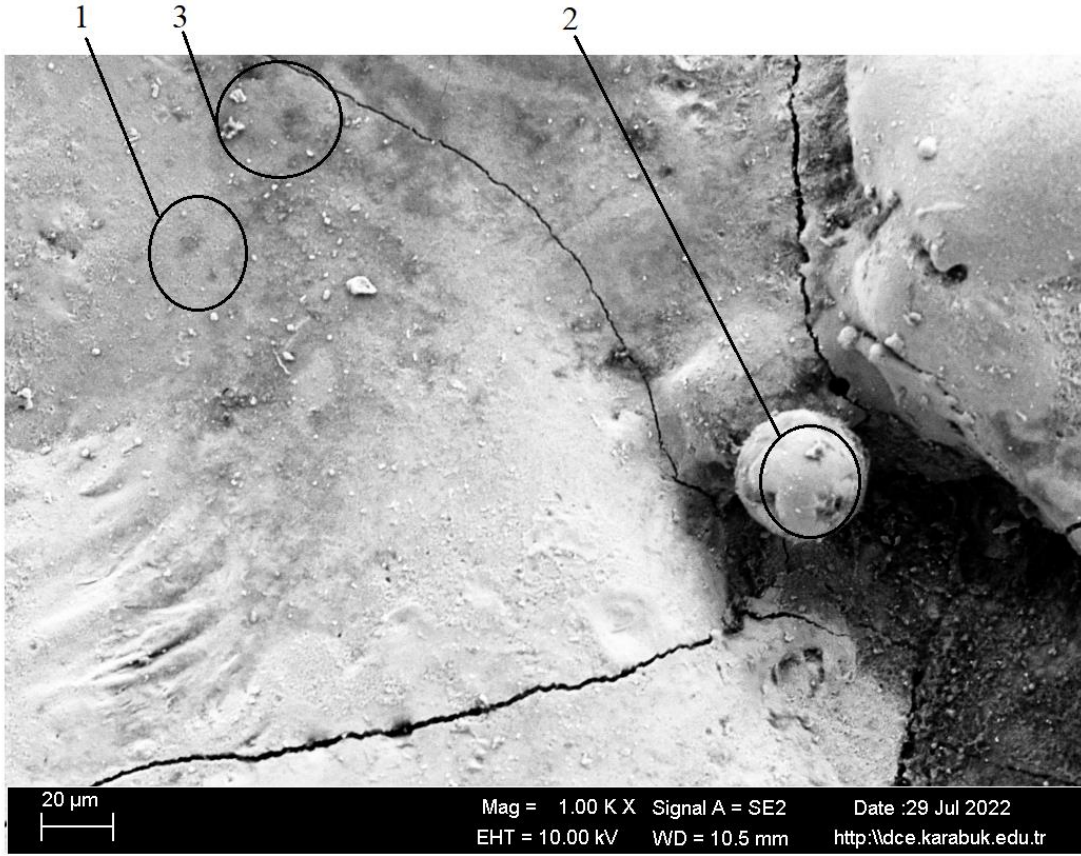
Şekil 5.5. NiTi ŞHA numunesinin E₁ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 μs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütmeli SEM görüntüsü.



Mass percent (%)

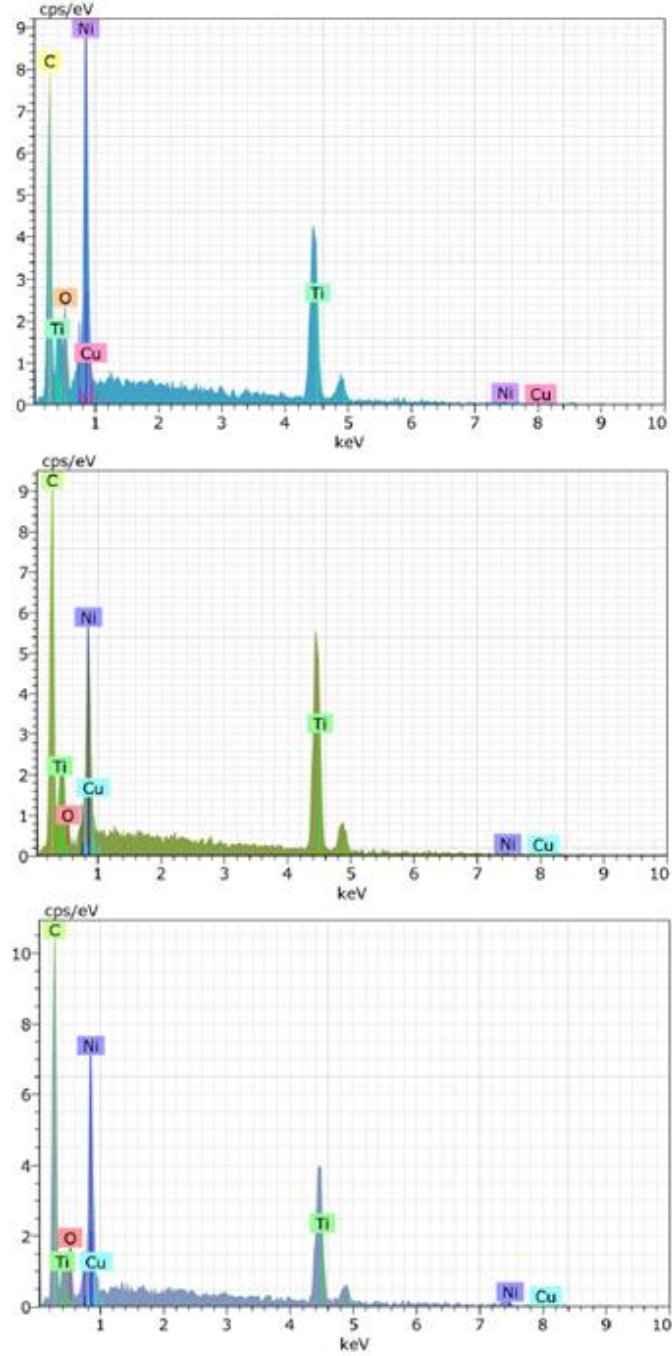
Spectrum	C	O	Ti	Ni	Cu
1	37.87	13.16	20.95	27.76	0.26
2	26.57	2.03	26.03	45.37	0.00
3	27.53	6.07	28.46	37.95	0.00
Mean value:	30.66	7.09	25.15	37.03	0.09
Sigma:	6.27	5.63	3.83	8.84	0.15
Sigma mean:	3.62	3.25	2.21	5.10	0.09

Şekil 5.6. NiTi ŞHA numunesinin E₁ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları.



Şekil 5.7. NiTi ŞHA numunesinin E₁ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 μ s) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü.

Şekil 5.7'deki üç farklı bölgeden alınan EDX analizi sonuçları Şekil 5.8'de verilmiştir. İkinci bölge EDX verileri incelendiğinde kalıntı oluşumlarının varlığı (Cu) tespit edilmiştir. Ayrıca, karbon ve oksijen kompozisyonlarının varlığında artış, Ni oranındaki ise önemli düşüşler verilere yansımıştır. Bu durum, artan akım değeri ile ark (kıvılcım) oluşumdaki artışların yüzeyden daha kontrolsüz talaş kaldırmayı tetiklemesinden kaynaklanmaktadır [59].

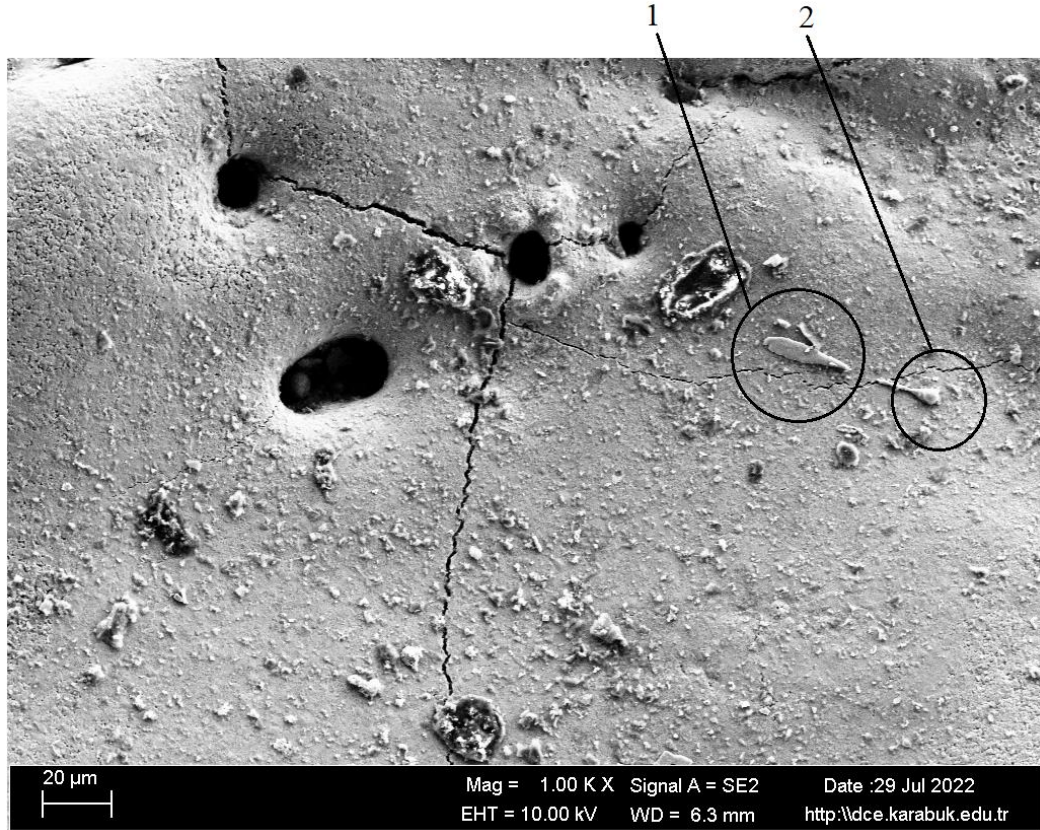


Mass percent (%)

Spectrum	C	O	Ti	Ni	Cu
1	24.29	8.91	34.32	32.31	0.17
2	28.26	2.76	45.98	21.51	1.49
3	32.40	7.42	32.97	25.88	1.33
Mean value:	28.32	6.36	37.76	26.57	1.00
Sigma:	4.05	3.21	7.15	5.43	0.72
Sigma mean:	2.34	1.85	4.13	3.14	0.42

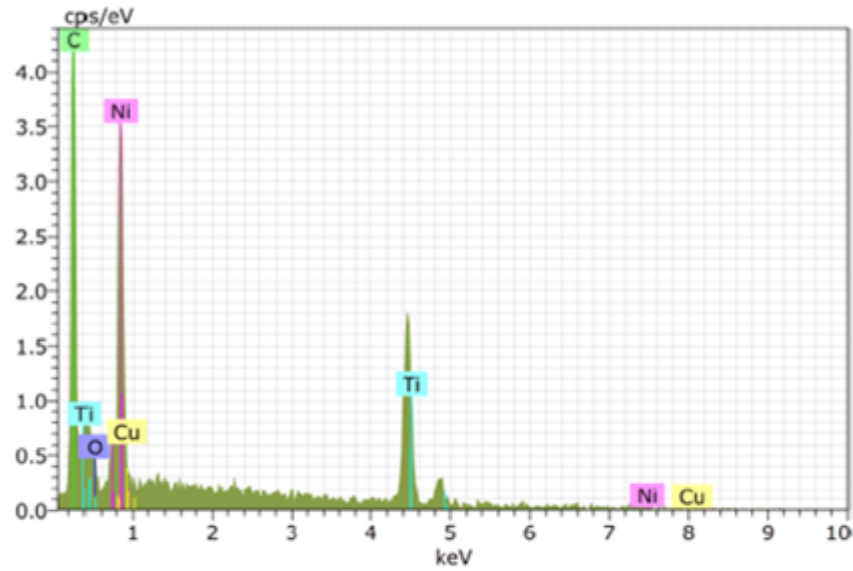
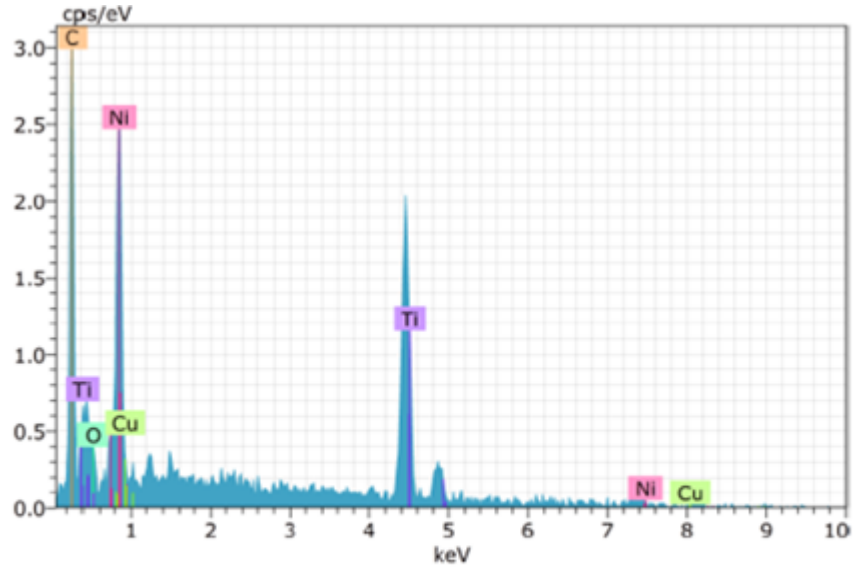
Şekil 5.8. NiTi ŞHA numunesinin E₁ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları.

E₂ elektrot ile akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) parametre değerlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde deney numunesi yüzeyine ait SEM görüntüsü Şekil 5.9'da verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, E₁ elektrot ile işlemede olduğu gibi E₂ elektrot ile işlenen yüzeylerde de çatlak ve çukur oluşumlarının varlığı görülmektedir.



Şekil 5.9. NiTi ŞHA numunesinin E₂ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü.

Şekil 5.9'daki iki farklı bölgeden alınan EDX analizi sonuçları Şekil 5.10'da verilmiştir. Ölçümü yapılan birinci bölgede karbon ve oksijen kompozisyonlarının varlığındaki artışın Ti oranını olumsuz yönde etkilemediği (%44,09→%44,13) tespit edilmiştir.



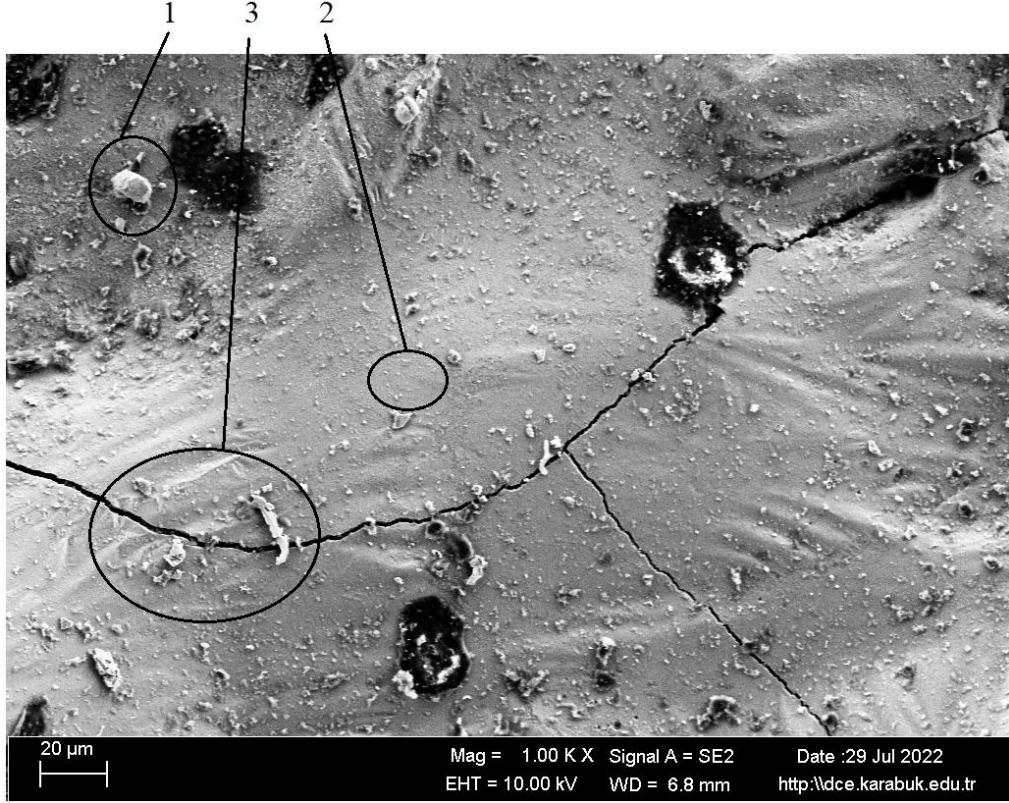
Mass percent (%)

Spectrum	C	O	Ti	Ni	Cu
1	25.41	4.19	44.13	26.28	0.00
2	32.41	4.12	34.05	29.42	0.00
Mean value:	28.91	4.15	39.09	27.85	0.00
Sigma:	4.95	0.05	7.13	2.22	0.00
Sigma mean:	3.50	0.03	5.04	1.57	0.00

Şekil 5.10. NiTi ŞHA numunesinin E₂ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları.

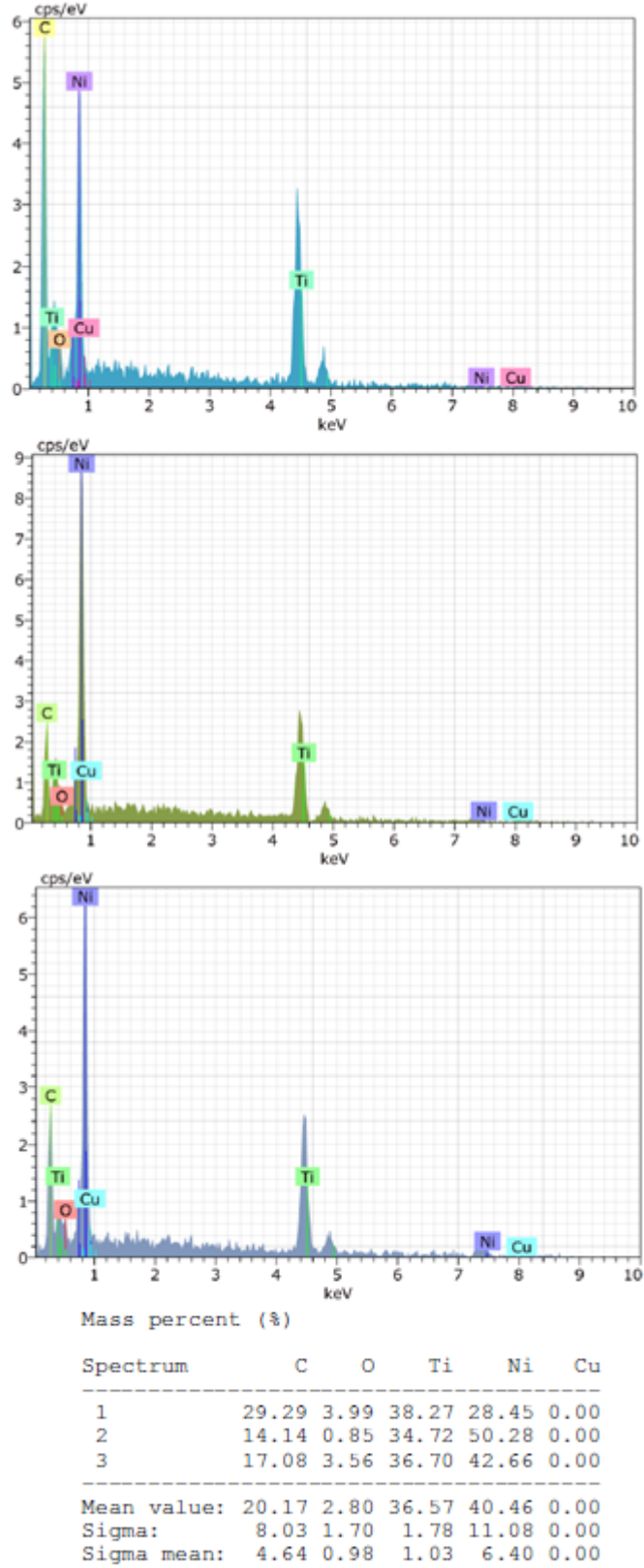
E₂ elektrot ile artan akım (6→12 A) değerinin sonucunda oluşan yüzey yapısına ait SEM görüntüsü 5.11’de verilmiştir. Özellikle birinci bölge çevresinde gözlemlenen karartılar artan karbon yapısına atfedilebilmektedir. İkinci bölgede, çukur ve çatlakların oluşmadığı daha uygun bir yüzey formunun elde edilebildiği

görülmektedir. Üçüncü bölgede ise diğer tüm SEM görüntülerinde rastlanıldığı üzere çatlak oluşumlarının varlığı görülmüştür.



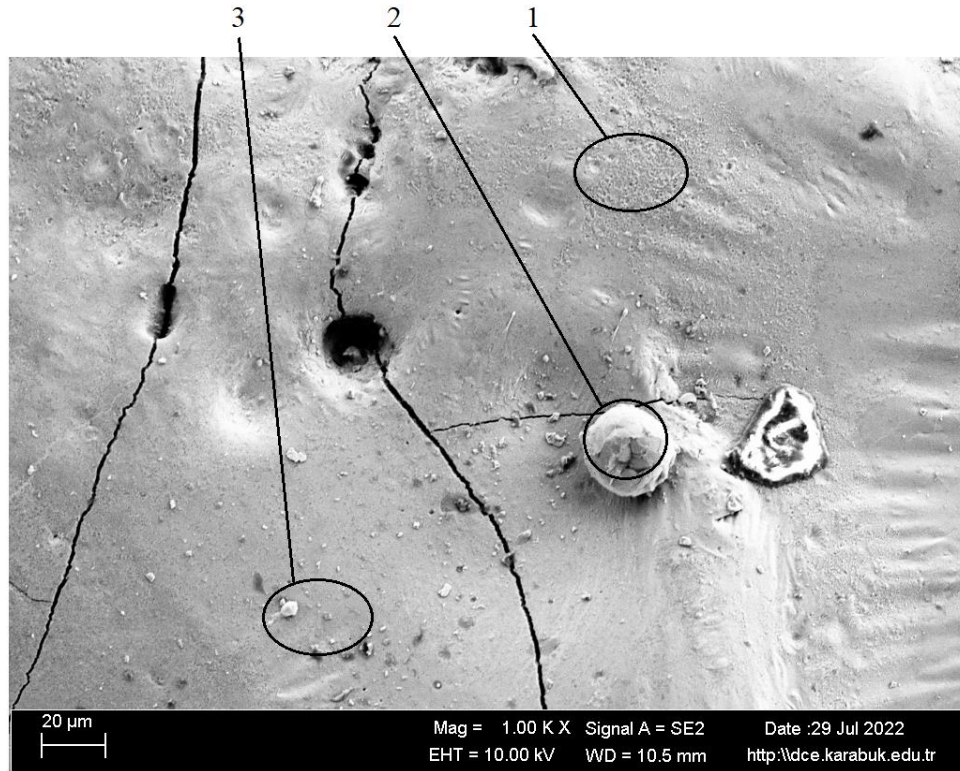
Şekil 5.11. NiTi ŞHA numunesinin E₂ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü.

Şekil 5.11'deki üç farklı bölgeden alınan EDX analizi sonuçları Şekil 5.12'de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, ikinci bölgede ölçülen Ni konsantrasyonunun talaş kaldırma operasyonundaki olumsuzluklardan minimum düzeyde etkilendiği sonucuna varılmıştır. Birinci bölgeden alınan veriler ise SEM görüntüsündeki karartıların karbon oluşumlarının varlığından kaynaklanabileceği sonucunu doğrulamıştır [80].



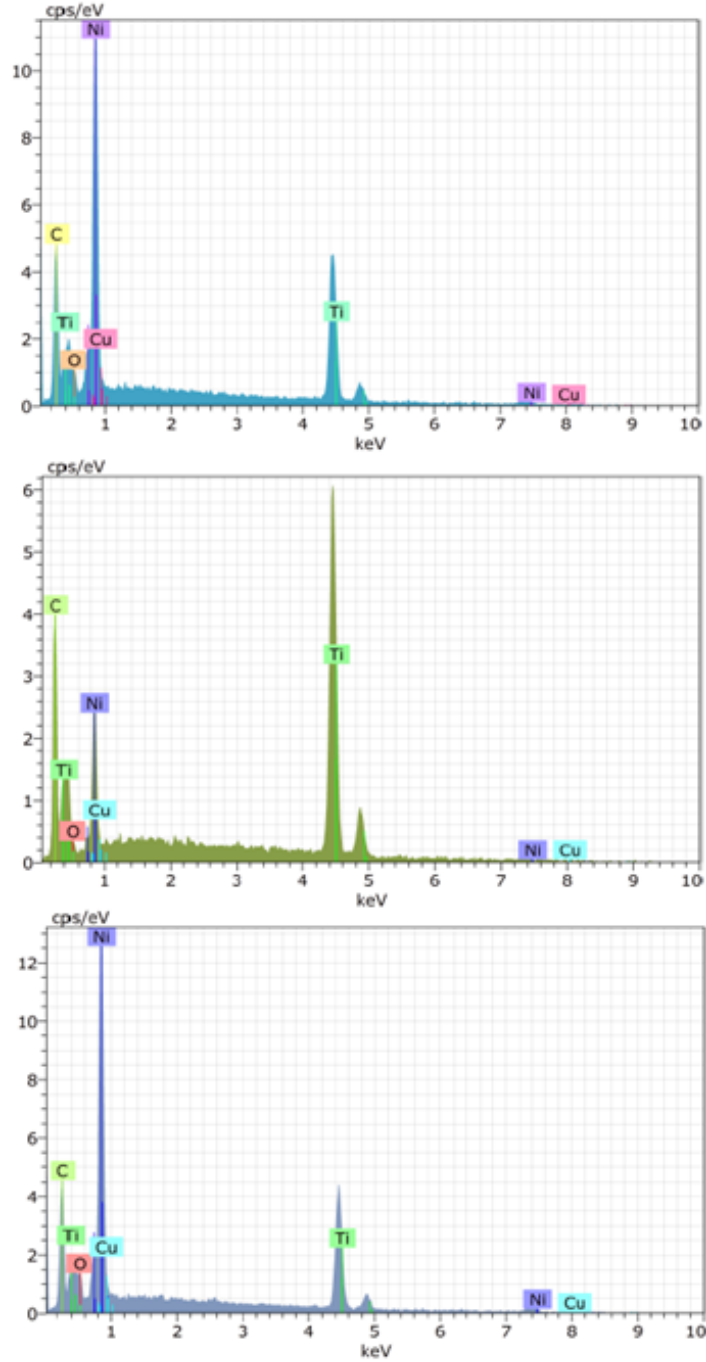
Şekil 5.12. NiTi ŞHA numunesinin E₂ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları.

E_3 elektrot ile akım (6 A) ve vurum süresi (200 μ s) parametre değerlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde deney numunesi yüzeyine ait SEM görüntüsü Şekil 5.13'te verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, E_1 ve E_2 elektrotlarında olduğu gibi E_3 elektrot ile işlenen yüzeylerde de çatlak ve çukur oluşumlarının varlığı görülmüştür. E_1 ve E_2 elektrotlar ile işlenen yüzeyler ile kıyaslandığında E_3 elektrot ile elde edilen yüzeyde karartıların daha az oluştuğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla karbon oluşumunun malzemenin kimyasal kompozisyonunu önemli miktarda etkilemediği görülmüştür. Ayrıca, işlenen yüzeyin SEM görüntüsü incelendiğinde talaş kaldırma esnasında meydana gelen kopmaların yüzeyde yapışma sorunlarıyla en az miktarda sonuçlandığı görülmektedir [73].



Şekil 5.13. NiTi ŞHA numunesinin E_3 elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 μ s) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütme SEM görüntüsü.

Şekil 5.13'teki iki farklı bölgeden alınan EDX analizi sonuçları Şekil 5.14'te verilmiştir. Ölçümü yapılan ikinci bölgede karbon ve Ti kompozisyonlarının varlığındaki artış tespit edilmiştir. Ni elementindeki azalma ve TiC yapının oluşması sonucunda malzemenin şekil hafıza davranışlarını yitirmesi, biyouyumluluğunu kaybetmesi gibi olumsuz sonuçlar ortaya çıkabilmektedir.

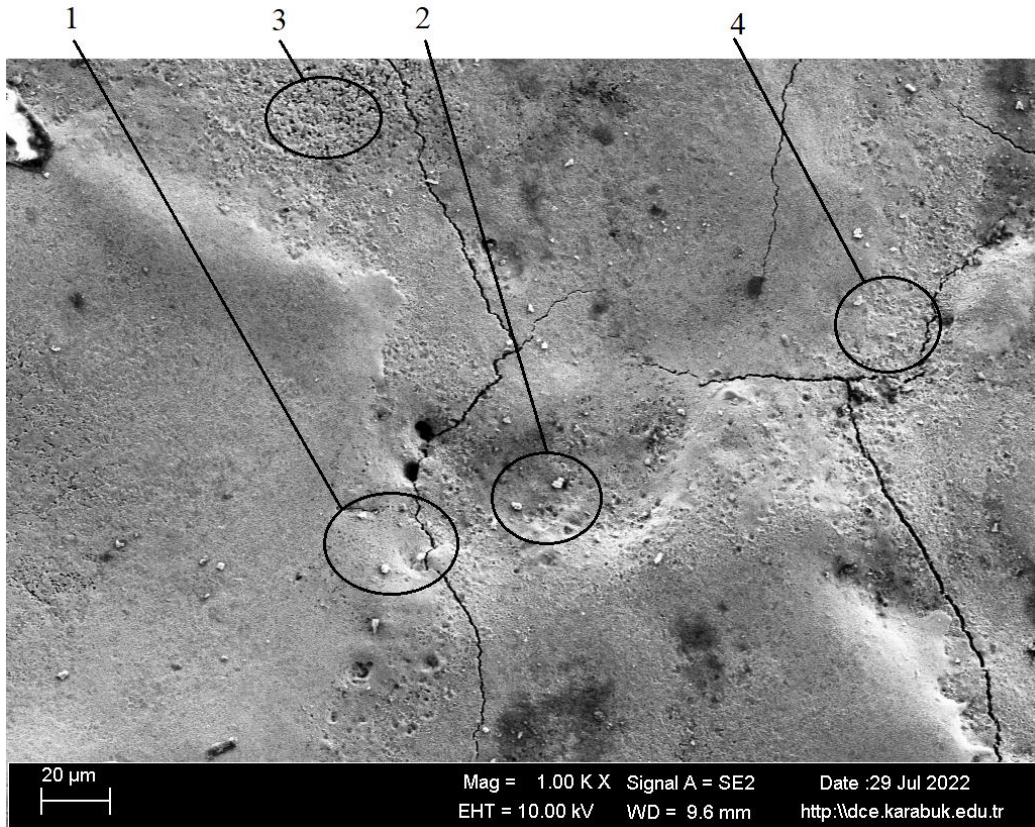


Mass percent (%)

Spectrum	C	O	Ti	Ni	Cu
1	17.32	3.34	37.10	42.24	0.00
2	16.24	0.95	69.36	13.45	0.00
3	16.15	4.36	32.64	46.85	0.00
Mean value:	16.57	2.88	46.37	34.18	0.00
Sigma:	0.65	1.75	20.04	18.10	0.00
Sigma mean:	0.38	1.01	11.57	10.45	0.00

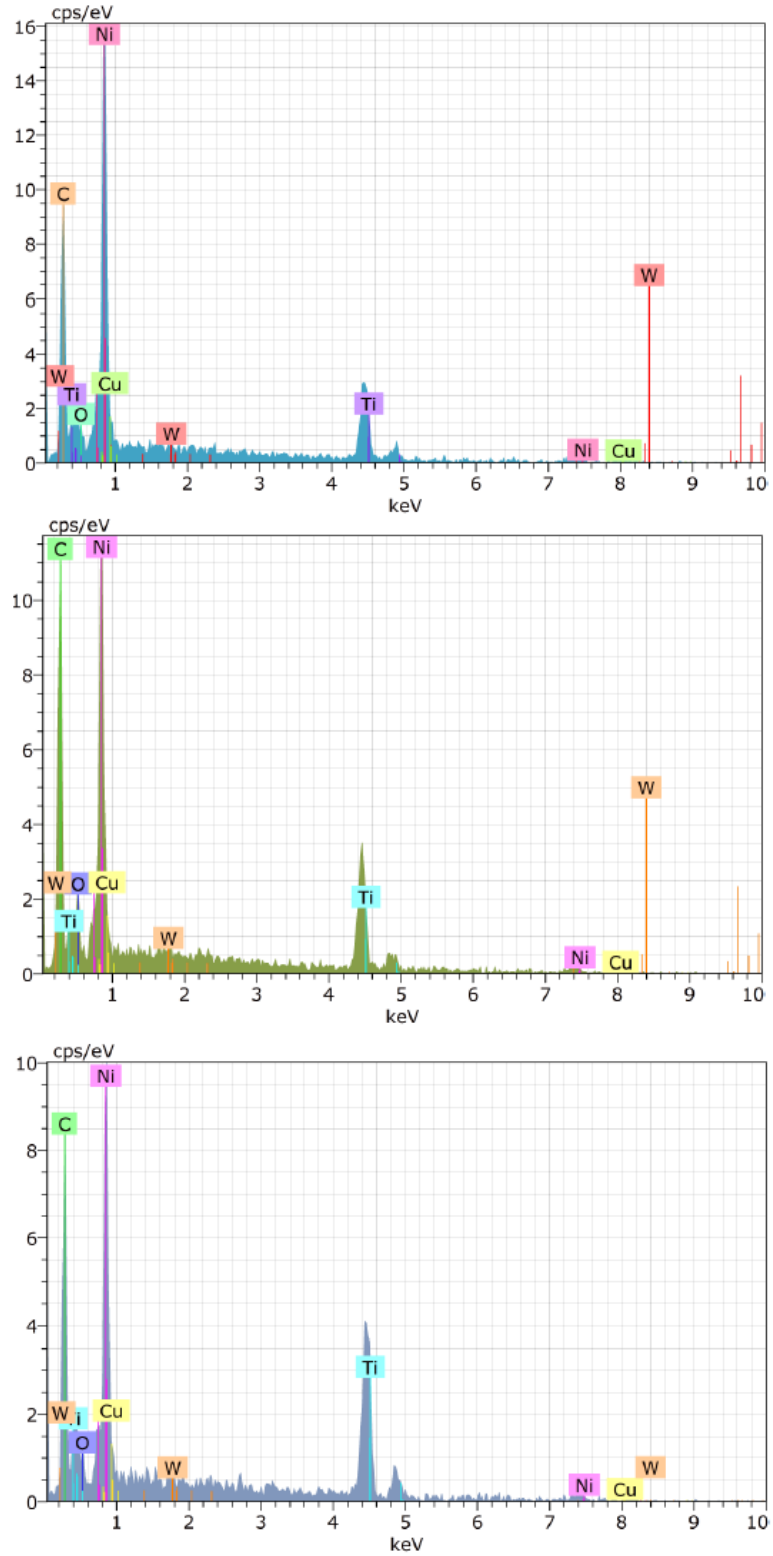
Şekil 5.14. NiTi ŞHA numunesinin E₃ elektrot, akım (6 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları.

E₃ elektrot ile artan akım (6→12 A) değerinin sonucunda oluşan yüzey yapısına ait SEM görüntüsü 5.15'te verilmiştir. Şekil 5.15 incelendiğinde, akım değerinin artmasıyla yüzeydeki karartıların arttığı tespit edilmiştir. Karbon oranındaki artışın yüzeyde oluşturduğu karartının yanı sıra talaş kaldırma işlemi sırasında dielektrik sıvı ile atılmayan ve bunun sonucunda iş parçası yüzeyine yapışan parçaların varlığı görülmektedir.

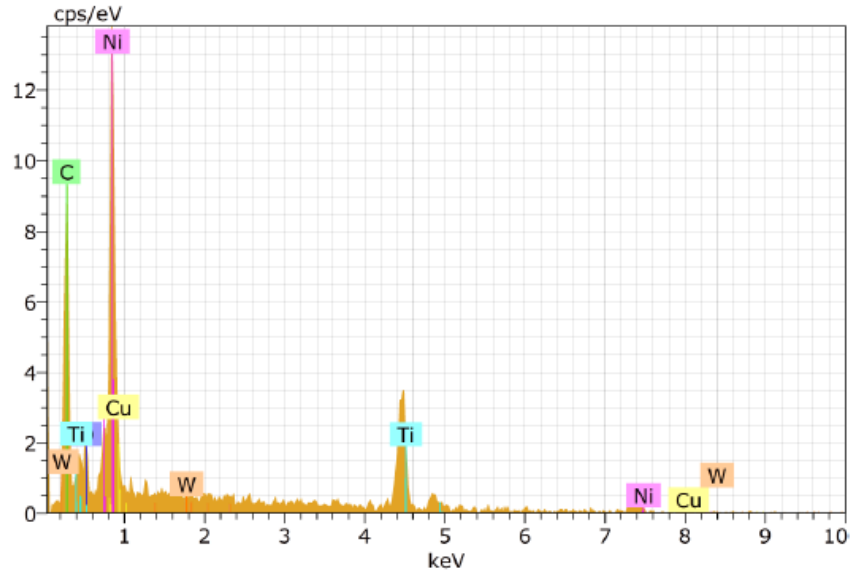


Şekil 5.15. NiTi ŞHA numunesinin E₃ elektrot, akım (12 A) ve vuruş süresi (200 μs) değerlerinde işlenmesi sonucunda oluşan yüzey yapısının 1000x büyütmeli SEM görüntüsü.

Şekil 5.15'teki dört farklı bölgeden alınan EDX analizi sonuçları Şekil 5.16'da verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, dört farklı bölgenin üçünde elektrot malzemesi olan W ve Cu konsantrasyonlarının varlığı tespit edilmiştir. Artan akım değerinin elektrot aşınmasıyla sonuçlandığı ve talaş kaldırma sırasında yüzeyde oluşan yüksek ısının kopan parçaları yüzeye yapıştırmaktan sorumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. NiTi ŞHA numunesinin E₃ elektrot, akım (12 A) ve vurum süresi (200 µs) değerlerinde işlenmesi sonrasında oluşan yüzey yapısının EDX analiz sonuçları.



Mass percent (%)

Spectrum	C	O	Ti	Ni	Cu	W
1	28.31	3.15	20.93	45.26	1.94	0.41
2	31.88	6.83	23.56	35.58	1.93	0.22
3	25.25	3.41	35.37	33.34	2.49	0.14
4	27.64	6.00	23.95	39.53	2.87	0.00
Mean value:	28.27	4.85	25.95	38.43	2.31	0.19
Sigma:	2.74	1.84	6.42	5.22	0.46	0.17
Sigma mean:	1.37	0.92	3.21	2.61	0.23	0.09

Şekil 5.16. (devam ediyor).

5.3. DELİK ÇAP ÖLÇÜMÜ

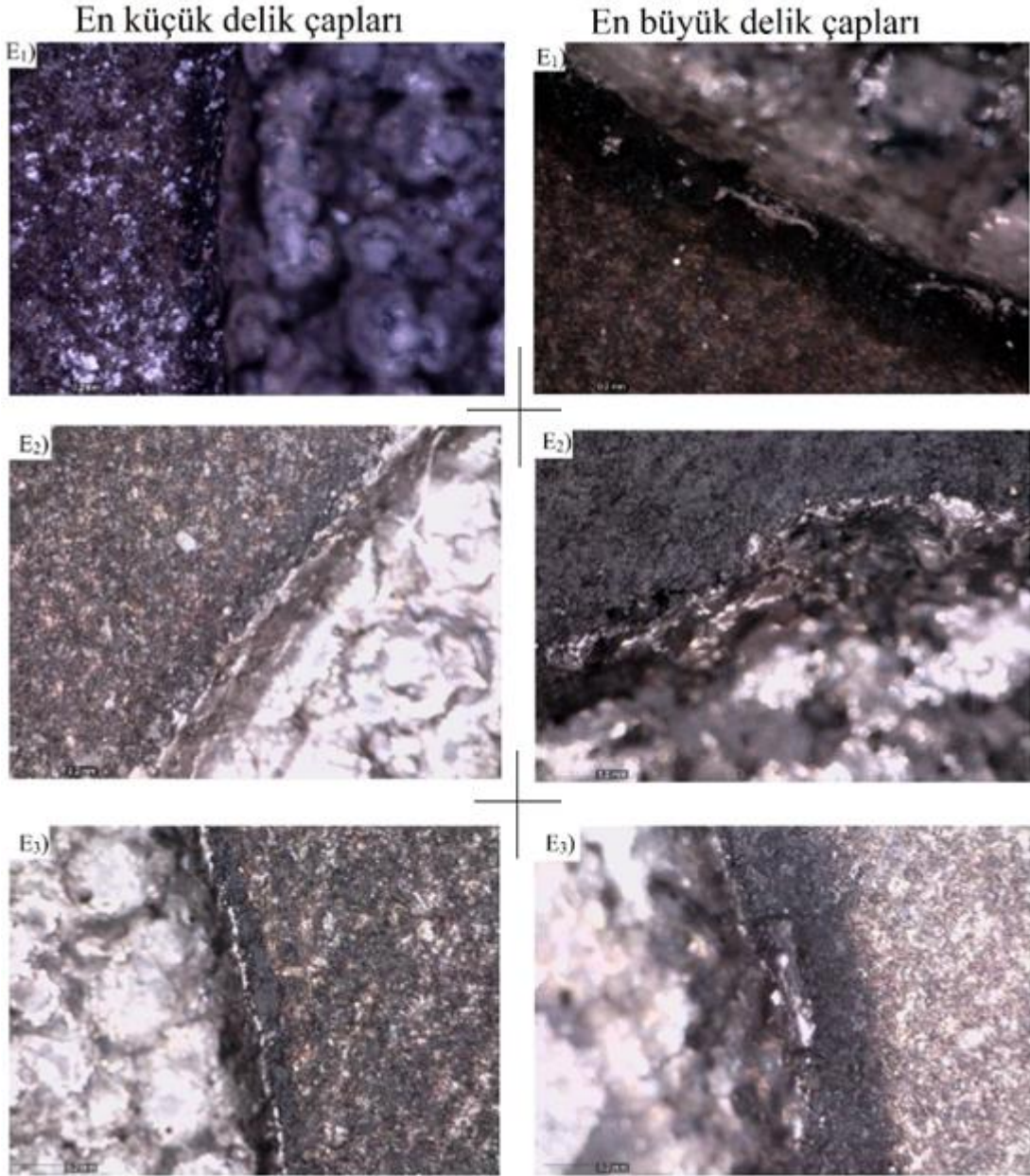
Belirlenen deneysel parametreler ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemleri sonucunda elde edilen delik kalitesi ve delik çaplarının boyutu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu elde edilen numunelerin delik ölçüm sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. NiTi ŞHA numunelerin çeşitli işleme parametrelerinde işlenmeleri sonrası elde edilen delik çap ölçüleri.

Sıra no	Akım (A)	Vurum süresi (µs)	Elektrot			Delik çapı (mm)		
			Cu	C	WCu	D ₁	D ₂	D ₃
1	6	200	E ₁	E ₂	E ₃	12,918	12,888	13,164
2	6	400	E ₁	E ₂	E ₃	13,012	12,911	13,44
3	6	600	E ₁	E ₂	E ₃	13,216	12,992	13,38
4	12	200	E ₁	E ₂	E ₃	13,256	12,77	13,06
5	12	400	E ₁	E ₂	E ₃	13,4	12,924	13,064
6	12	600	E ₁	E ₂	E ₃	13,43	13,198	13,608
7	18	200	E ₁	E ₂	E ₃	13,134	13,004	13,04
8	18	400	E ₁	E ₂	E ₃	13,204	13,022	13,35
9	18	600	E ₁	E ₂	E ₃	13,254	13,185	13,354

EEİ ile 12 mm çapında elektrot malzemeler (E₁, E₂, E₃) kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda; 6 A akımla ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün E₂ elektrot ile 200 µs vurum süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise E₃ elektrot ile 400 µs vurum süresinde işlenen deney numunesinde elde edilmiştir. 12 A akımla gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün E₂ elektrot ile 200 µs vurum süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise E₃ elektrot ile 600 µs vurum süresinde işlenen deney numunesinde elde edilmiştir. 18 A akımla gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün E₁ elektrot ile 200 µs vurum süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise E₃ elektrot ile 600 µs vurum süresinde işlenen deney numunesinde elde edilmiştir [81].

Üç farklı elektrot (E₁, E₂, E₃) ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucu en büyük ve en küçük delik çaplarının mikroskop (Dino-Lite Digital) görüntüleri Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. E₁, E₂ ve E₃ elektrot ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda en büyük ve en küçük delik çapının oluştuğu numunelerin mikroskopik (Dino-Lite Digital) görüntüleri.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucu mikroskop görüntüleri incelendiğinde; deney numunelerinin elektrot ile ilk temas ettiği bölgelerde arkların küçük hasarlar oluşturduğu, büyük delik çapının oluşturduğu bölgelerde ise elektrotun ilk temas ettiği alanlarda arkların hasarlarının daha büyük olduğu tespit edilmiştir [81].

5.4. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

EEİ yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemleri sonrası işleme parametrelerinin değişken faktörler üzerindeki etki derecelerini tespit etmek için Varyans (ANOVA) analizi uygulanmıştır. Analiz, %5 anlamlılık seviyesi ve %95 güvenilirlik seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Faktörlerin etki derecelerini tespit etmek ve etki derecelerinin sıralamasını tayin etmek için Minitab 18 paket programı kullanılmıştır.

5.4.1. Talaş Kaldırma Oranı ANOVA Verileri

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin varyans analizi yapılarak akım ve vuruş süresi parametre değerlerinin talaş kaldırma oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Talaş kaldırma oranı deney verileri Çizelge 5.2’de ve deney numunesinin Talaş Kaldırma Oranı (TKO) değerine bağlı varyans analizi sonuçları Çizelge 5.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Talaş kaldırma oranı deney verileri.

Sıra no	Akım (A)	Vuruş süresi (µs)	Elektrot			Talaş Kaldırma Oranı (malzeme aşınma farkı/dakika)		
			Cu	C	WCu	TKO ₁	TKO ₂	TKO ₃
1	6	200	E ₁	E ₂	E ₃	0,0029	0,0021	0,0026
2	6	400	E ₁	E ₂	E ₃	0,0022	0,0016	0,0019
3	6	600	E ₁	E ₂	E ₃	0,0021	0,0008	0,0021
4	12	200	E ₁	E ₂	E ₃	0,0012	0,0241	0,0160
5	12	400	E ₁	E ₂	E ₃	0,0132	0,0067	0,0081
6	12	600	E ₁	E ₂	E ₃	0,0063	0,0039	0,0080
7	18	200	E ₁	E ₂	E ₃	0,0426	0,0532	0,0326
8	18	400	E ₁	E ₂	E ₃	0,0205	0,0218	0,0218
9	18	600	E ₁	E ₂	E ₃	0,0127	0,0077	0,0175

Çizelge 5.3. NiTi ŞHA deney numunesinin talaş kaldırma oranı bağlı varyans analizi sonuçları.

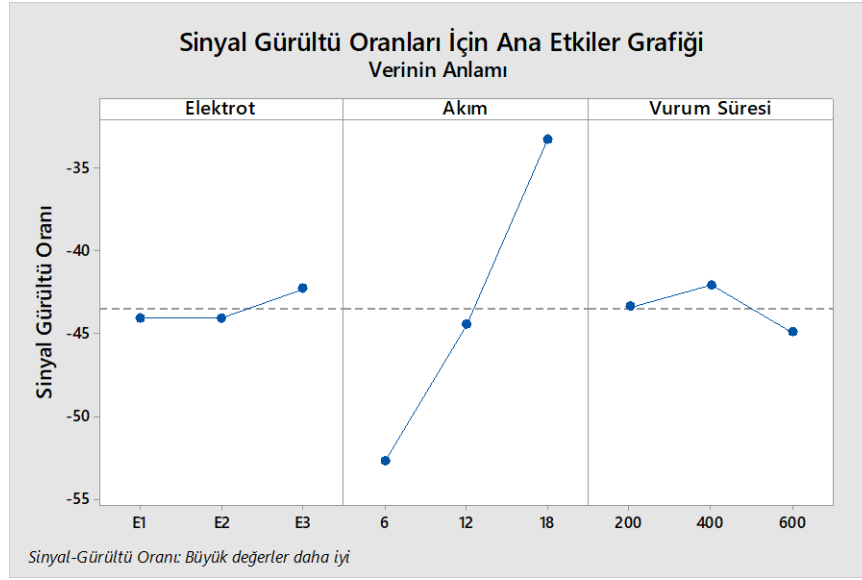
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Sıralı Kareler Toplamı	Katkı (%)	Kareler Toplamı	Ort. Kareler Top.	F-Değeri	P-Değeri
Elektrot	2	<0,01	0,01%	<0,01	<0,01	0,00	1,00
Akım	2	<0,01	62,60%	<0,01	<0,01	22,41	<0,01
Vurum süresi	2	<0,01	9,50%	<0,01	<0,01	3,39	0,04
Hata	20	<0,01	27,89%	<0,01	<0,01		
Toplam	26	<0,01	100,0%				

S	Belirleme Katsayısı (%)	Düzeltilmiş Belirleme Katsayısı (%)	Öngörülen Belirleme Katsayısı (%)
0,01	72,06%	63,68%	49,09%

Çizelge 5.3’de P anlamlılık değeri incelendiğinde 0,05 altında olan değerlerin akım ve vurum süresi olduğu görülmüştür. Talaş kaldırma oranı değerine %62,60 ile akım parametre değerinin etkisi olduğu tespit edilmiştir. Elektrot parametre değerinin ise %0,01 etki ile talaş kaldırma değeri üzerine oldukça az etkisinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelgede verilen belirleme katsayısı ifadesi ise, değerlendirilmek istenen sonuç için tercih edilen elektrot, akım ve vurum süresi deney parametrelerinin ne oranda etkili olduğunu göstermektedir. Bu parametreler talaş kaldırma oranı üzerindeki açıklanabilirliği Çizelge 5.3’de görüldüğü üzere %72,06’dır.

Şekil 5.18’de üç farklı elektrot, akım ve vurum süresi değerlerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemleri sonrası elde edilen talaş kaldırma oranlarına ait sinyal gürültü oranı grafiği verilmiştir. Akım değerinin artmasıyla talaş kaldırma oranı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Vurum süresi değerlerindeki farklılık ise talaş kaldırma oranına önemli ölçüde etki etmediği gözlemlenmiştir [54].

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda grafit elektrot ile en yüksek talaş kaldırma oranının (0,0532 malzeme aşınma farkı/dakika); 18 A akım ve 200 µs vurum süresi ile elde edildiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.18. Talaş kaldırma oranı için sinyal gürültü grafiği.

5.4.2. Ortalama Yüzey Pürüzlülük değerleri ANOVA Verileri

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin varyans analizi yapılarak akım ve vurum süresi parametre değerlerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Talaş kaldırma işlem sonrası ortalama yüzey pürüzlülük verileri Çizelge 5.4’de ve deney numunesinin ortalama yüzey pürüzlülüğü oranına bağlı varyans analizi sonuçları Çizelge 5.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Talaş kaldırma işlem sonrası ortalama yüzey pürüzlülük verileri.

Sıra no	Akım (A)	Vurum süresi (µs)	Elektrot			Ortalama Yüzey Pürüzlülük Oranı (µm)		
			Cu	C	WCu	Ra1 (E1)	Ra2 (E2)	Ra3 (E3)
1	6	200	E ₁	E ₂	E ₃	2,6742	5,9692	8,0058
2	6	400	E ₁	E ₂	E ₃	4,0742	3,4970	3,6580
3	6	600	E ₁	E ₂	E ₃	3,1590	3,8650	3,6130
4	12	200	E ₁	E ₂	E ₃	10,6074	9,2348	13,0646
5	12	400	E ₁	E ₂	E ₃	5,1790	5,1584	6,7476
6	12	600	E ₁	E ₂	E ₃	3,7078	3,7980	3,3860
7	18	200	E ₁	E ₂	E ₃	2,8628	3,9608	3,3400
8	18	400	E ₁	E ₂	E ₃	3,7312	3,6342	5,1678
9	18	600	E ₁	E ₂	E ₃	3,4862	6,3898	3,6560

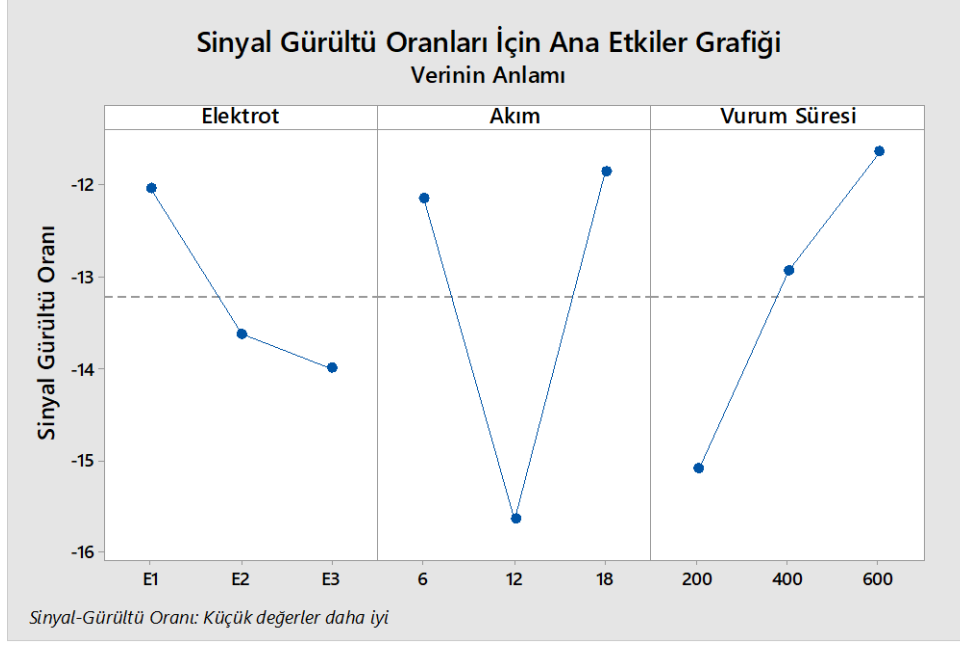
Çizelge 5.5. NiTi ŞHA deney numunesinin ortalama yüzey pürüzlülük oranına bağlı varyans analizi sonuçları.

Kaynak	Serbetslik Derecesi	Sıralı Kareler Toplamı	Katkı (%)	Kareler Toplamı	Ort. Kareler Toplamı	F-Değeri	P-Değeri
Elektrot	2	6,93	4,12%	6,93	3,47	0,84	0,45
Akım	2	41,24	24,54%	41,24	20,62	4,97	0,02
Vurum süresi	2	36,95	21,99%	36,95	18,48	4,45	0,03
Hata	20	82,95	49,35%	82,95	4,15		
Toplam	26	168,07	100,00%				

S	Belirleme Katsayısı (%)	Düzeltilmiş Belirleme Katsayısı (%)	Öngörülen Belirleme Katsayısı (%)
2,04	50,65%	35,84%	10,05%

Çizelge 5.5’de P anlamlılık değeri incelendiğinde 0,05 altında olan değerlerin akım ve vurum süresi olduğu görülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine %41,24 ile akım parametre değerinin etkisi olduğu tespit edilmiştir. Vurum süresi parametre değerinin ise %36,95 etki ile akım parametre değerinin etkisine kıyasla az olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çizelgede verilen düzeltilmiş belirleme katsayısı ifadesi ise, değerlendirilmek istenen sonuç için tercih edilen elektrot, akım ve vurum süresi deney parametrelerinin ne oranda etkili olduğunu göstermektedir. Bu parametrelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki açıklanabilirliği Çizelge 5.5’de görüldüğü üzere, %50,65’dir.

Şekil 5.19’da üç farklı elektrot, akım ve vurum süresi değerlerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemleri sonrası ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerine ait sinyal gürültü oranı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde, E₂ ve E₃ elektrotları ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde yüzey kalitesi bakımından olumlu sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir [54]. Vurum süresinin artan değerleri işlenen yüzeydeki ortalama yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilemiştir. Düşük akım (6 A) değerlerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde yeterli arkın oluşmaması, yüksek akım (18 A) değerinde ise talaş kaldırmanın kontrolsüz şekilde gerçekleşmesi yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemiştir [58].



Şekil 5.19. Ortalama yüzey pürüzlülüğü oranı için sinyal gürültü grafiği.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, bakır elektrot ile en düşük ortalama yüzey pürüzlülük oranının ($2,6742 \mu\text{m}$); 6 A ve 200 μs vurum süresi değerlerinde elde edildiği tespit edilmiştir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Nikel-Titanyum (NiTi) Şekil Hafızalı Alaşımların (ŞHA) üstün mekanik özellikleri (süperelastik ve şekil hafıza etkisi) ve fiziksel özellikleri nedeniyle geleneksel (modern olmayan) imalat yöntemleri ile işlenmesi oldukça zordur. Bu nedenle NiTi ŞHA'ların işlenmesinde geleneksel olmayan (modern) imalat yöntemleri tercih edilmektedir. Bu çalışmada NiTi ŞHA'ların EEİ yöntemi kullanılarak işlenebilirliği araştırılmıştır. Talaş kaldırma işlemleri sonrası deney numunelerinin yüzey yapısında meydana gelen değişimler SEM ve EDX cihazları ile incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular;

- E₁ elektrot vasıtasıyla, farklı akım (6 ve 12 A) ve aynı vuruş süresi (200 µs) değerlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda akım değerinin artmasıyla oluşan krater derinliğinin arttığı görülmüştür.
- E₂ ve E₃ elektrotlar ile gerçekleştirilen deney çalışmalarında akım değerinin artmasıyla krater derinliğinin arttığı tespit edilmiştir.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine %24,54 ile akım parametre değerinin etkisi olduğu tespit edilmiştir. Akım değerinin artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı görülmüştür.
- E₁ elektrot ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminde en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.
- E₁ elektrot ile akım (6 A) ve vuruş süresi (200 µs) parametre değerlerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma operasyonu sonrası deney numunesi yüzeyinde malzemedan ya da elektrottan kopmak suretiyle ayrılan Cu ve TiC oluşumlarının varlığı gözlemlenmiştir.
- E₁ elektrot ile işlemede olduğu gibi E₂ elektrot ile işlenen yüzeylerde de çatlak ve çukur oluşumlarının varlığı görülmüştür.

- E₃ elektrot ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminde artan akım (6→12 A) değerinin beraberinde yüzeydeki karartıların arttığı görülmüştür. Karbon oranındaki artışın yüzeyde oluşturduğu karartının yanı sıra talaş kaldırma işlemi sırasında dielektrik sıvı ile atılamayan ve bunun sonucunda iş parçası yüzeyine yapışan parçaların varlığı görülmektedir.
- E₃ elektrot ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminde deney numune yüzeyinde W ve Cu konsantrasyonlarının varlığı tespit edilmiştir. Artan akım değerinin elektrot aşınmasıyla sonuçlandığı ve talaş kaldırma sırasında yüzeyde oluşan yüksek ısının kopan parçaları yüzeye yapıştırmaktan sorumlu olduğu görülmüştür.
- 6 A akımla ile gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün E₂ elektrot ile 200 µs vurum süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise E₃ elektrot ile 400 µs vurum süresinde işlenen deney numunesinde elde edildiği tespit edilmiştir.
- 12 A akımla gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün E₂ elektrot ile 200 µs vurum süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise E₃ elektrot ile 600 µs vurum süresinde işlenen deney numunesinde elde edilmiştir.
- 18 A akımla gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde elektrot çapına en yakın çap ölçüsünün E₂ elektrot ile 200 µs vurum süresinde işlenen numunede, en büyük çap ölçüsünün ise E₃ elektrot ile 600 µs vurum süresinde işlenen deney numunesinde elde edilmiştir.
- Talaş kaldırma oranı değerine %62,60 ile akım parametre değerinin etkisi olduğu tespit edilmiştir.
- Elektrot parametre değerinin akım parametre değerine kıyasla talaş kaldırma değeri etkisi üzerine %0,01 ile oldukça az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Güven, S., “Yüksek sıcaklık, yaşlandırma ve kriyojenik koşulların nikel-titanyum şekil hafızalı alaşımların mekanik özelliklerine ve faz dönüşüm sıcaklıklarına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Karabük, 15-30 (2020).
2. Güven, S., Altın Karataş, M., Gökkaya, H., Akınay, Y., “Süperelastik NiTi şekil hafızalı alaşımların mekanik özelliklerine yüksek sıcaklık ve yaşlandırma ısıl işleminin etkisi”, **Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi**, 13(1): 27-34 (2022).
3. Naresh, C., Bose, P. S. C., Rao, C. S. P., “Shape memory alloys: a state of art review”, **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 149(2016): 1-13 (2016).
4. Yang, C., Abanteriba, S., Becker, A., “A review of shape memory alloy based filtration devices”, **AIP Advances**, 10(060701): 1-12 (2020).
5. Memiş, N. K., Kaplan, S., “Şekil hafızalı polimerler ve tekstil uygulamaları”, **Tekstil ve Mühendis**, 25(111): 264-283 (2018).
6. Çalışır, A., Akçay, M. T., Sürmeli, B., “Metro istasyonlarında piezoelektrik malzeme kullanarak elektrik enerjisi üretilmesi”, **İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 2(1): 1-6 (2020).
7. Toptaş, E., “Şekil hafızalı metaller ile aktüatör tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 45-60 (2006).
8. Yılmaz, M., Güven, S., Motorcu, A. R., Gökkaya, H., “Nikel-titanyum şekil hafızalı alaşımların elektro erozyon ile işlenebilirliği: işleme parametrelerinin yüzey yapısı ve mekanik özellikler üzerine etkilerinin araştırılması üzerine bir derleme çalışması”, **8. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi**, 707-714 (2021).
9. Drossel, W., Kunze, H., Bucht, A., Meinel, F., “Smart materials for smart production – a cross-disciplinary innovation network in the field of smart materials”, **Procedia Manufacturing**, 21, 197-204 (2018).
10. Tamay, D. G., Usal, T. D., Alagoz, A. S., Yücel, D., Hasirci, N., Hasirci, V., “3D and 4D printing of polymers for tissue engineering applications”, **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, 7, 1-22 (2019).

11. Qader, İ. N., Kök, M., Dagdelen, F., Aydogdu, Y., “A review of smart materials: researches and applications”, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6:(3), 755-788 (2019).
12. Kamila, S., “Introduction, classification and applications of smart materials: an overview”, *American Journal of Applied Sciences*, 10:(8), 876-880 (2013).
13. Gautam, P., Valiathan, A., “Bio-smart dentistry: stepping into the future”, *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*, 21:(2), 94-97 (2008).
14. Fairweather, J., “Designing with active materials: An impedance-based approach”, *Rensselaer Polytechnic Institute*, 105-125 (1998).
15. Sharma, P., “Vibration analysis of functionally graded piezoelectric actuators”, *Springer*, 52-60 (2019).
16. Uçar, S., “Teknik/akıllı tekstiller ve tasarımda kullanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi*, İstanbul, (2006).
17. Tao, X., “Smart fibres, fabrics and clothing: fundamentals and applications”, *Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute*, Washington, 87-95 (2001).
18. Orhon, A. V., “Akıllı malzemelerin mimarlıkta kullanımı”, *Ege Mimarlık*, 18-21 (2012).
19. Dilibal, S., “Nikel-titanyum şekil bellekli alaşımlar kullanılarak geliştirilen itü robot el ve performans analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2003).
20. Kalay, E., “Ni-Ti bazlı şekil hafızalı alaşımlarda termal yaşlandırma ve şekil hafıza etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 70-85 (2019).
21. Altuğ, G. S., “Nikel-titanyum alaşımlarının katmanlı imalat teknolojisi ile üretimi, karakterizasyonu ve özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 50-64 (2017).
22. Otsuka, K., Kakeshita, T., “Science and technology of shape-memory alloys: new developments”, *Cambridge University Press*, 27(2): 91-100 (2011).
23. Dilibal, S., “Nikel-titanyum şekil bellekli alaşım üretimi ve şekil bellek eğitimi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2005.
24. Funakubo, H., Kennedy, J. B., “Shape memory alloys”, *Gordon and Breach*, 1987.

25. Toptaş, E., Akkuş, N., “Şekil hafızalı alaşımlar ve endüstriyel uygulamaları”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4:(4), 15-22 (2007).
26. Gurka, M., “Active hybrid structures made of shape memory alloys and fiberreinforced composites”, *Multifunctionality of Polymer Composites: Challenges and New Solutions*, 727-751 (2015).
27. Aygahoğlu, A., “Şekil bellekli alaşımlar ve uygulama alanları”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1996).
28. Kaya, I., Karaca, H. E., Nagasako, M., Kainuma, R., “Effects of aging temperature and aging time on the mechanism of martensitic transformation in nickel-rich NiTi shape memory alloys”, *Materials Characterization*, 159, 1-7 (2020).
29. Lagoudas, D. C., “Shape memory alloys modeling and engineering applications”, *Springer*, 54-80 (2008).
30. Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., Hibson, M. A., “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities”, *Materials and Design*, 56, 1078-1113 (2014).
31. Machado, L., Savi, M., “Medical applications of shape memory alloys”, *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 36:(6), 683-691 (2003).
32. Tsuchiya, K., “Mechanisms and properties of shape memory effect and superelasticity in alloys and other materials: a practical guide”, *Materials Science*, 3-14 (2011).
33. Liu, H., Zhong, J., Lee, C., Lee, S. W., Lin, L., “A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications”, *Applied Physics Reviews*, 5: (4), 041306 (2018).
34. Kuna, M., “Fracture mechanics of piezoelectric materials—where are we right now? ”, *Engineering Fracture Mechanics*, 77(2): 309-326 (2010).
35. Aslan, E., Bilgin, M. Z., Erfidan, T., “Piezoseramik malzemelerle elektrik enerjisi üretilmesi ve depolanması”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5:(2), 66-76 (2016).
36. Vatansever Bayramol, D., “Piezoelektrik akıllı malzemeler ve tekstilde kullanımları”, *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(3), 61-67 (2014).
37. Brain, K. R., “Investigations of piezo-electric effects with dielectrics”, *Proceedings of the Physical Society of London*, 36(81): 81-93 (1923).
38. Fukada, E., “Piezoelectric properties of organic polymers”, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 238(1): 7-25 (1974).

39. Berkkurt, T. Z., Kumaş takviyeli polietilen malzemenin şekil hafızası özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2016.
40. Sevgi, H. E., “Piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit bir kirişin titreşim analizi ve kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 40-52 (2009).
41. Bedeloğlu, A. Ç., “Şekil hafızalı alaşımlar ve tekstil malzemelerindeki uygulamaları”, *Tekstil ve Mühendis*, 18(83): 27-37 (2011).
42. Lendlein, A., Kelch, S., “Shape-memory polymers”, *Angewandte Chemie International Edition*, 41(12): 2034-2057 (2002).
43. Yoo, S., Yeo, J., Hwang, S., Kim, Y. H., Hur, S. G., Kim, E. K., “Application of a NiTi alloy two-way shape memory helical coil for a versatile insulating jacket”, *Materials Science and Engineering A*, 481: 662-667 (2008).
44. Acar, E., Oktay, T., “Havacılık ve uzay uygulamalarında şekil hafızalı alaşımlar”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1): 335-349 (2018).
45. Anson, T., “Shape memory alloys—medical applications”, *Materials World*, 7(12): 745-747 (1999).
46. Yakıncı, Z. D., “Şekil hafızalı alaşımların sağlık alanındaki uygulamaları”, *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*, 3(2): 1-6 (2015).
47. Emre, A., “Şekil hafızalı alaşımların biyomedikal uygulamaları”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (14): 134-144 (2018).
48. Gangele, A., Mishra, A., “Surface roughness optimization during machining of Niti shape memory alloy by EEİ through Taguchi’s technique”, *Materials Today: Proceedings*, 29(2): 343-347 (2020).
49. Gaikwad, V. S., Jatti, V. S., Pawar, P. J. Nandurkar, K. N., “Multi-objective optimization of electrical discharge machining process during machining of NiTi alloy using Taguchi and utility concept”, *Techno-Societal 2018*, 479-489 (2020).
50. Coşkun, İ., Işık, M. F., “Elektroerozyon yöntemi ile tornalama”, *Politeknik Dergisi*, 11(4): 285-291 (2008).
51. Daneshmand, S., Kahrizi, E. F., Neyestanak, A. A. L., Ghahi, M. M., “Experimental investigations into electro discharge machining of NiTi shape memory alloys using rotational tool”, *International Journal of Electrochemical Science*, 8: 7484-7497 (2013).

52. Kulkarni, V. N., Gaitonde, V. N., Sureban, R., Patil, M. S., “Investigations on material removal rate during wire electrodischarge machining of nickel–titanium alloy”, *Emerging Trends in Mechanical Engineering*, 305-313 (2019).
53. Bisaria, H., Shandilya, P., “Experimental study on response parameters of Ni-rich NiTi shape memory alloy during wire electric discharge machining”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 330(012070): 1-6 (2017).
54. Jatti, V. S., Singh, T. P., “Effect of deep cryogenic treatment on machinability of NiTi shape memory alloys in electro discharge machining”, *Applied Mechanics and Materials*, 592-594: 197-201 (2014).
55. Sabouni, H. R., Daneshmand, S., “Investigation of the parameters of EEI process performed on smart NiTi alloy using graphite tools”, *Life Science Journal*, 9(4): 504-510 (2012).
56. Chen, S. L., Hsieh, S. F., Lin, H. C., Lin, M. H., Huang, J. S., “Electrical discharge machining of TiNiCr and TiNiZr ternary shape memory alloys”, *Materials Science and Engineering: A*, 445: 486-492 (2007).
57. Daneshmand, S., Hessami, R., Esfandiar, H., “Investigation of wire electro discharge machining of Nickel-Titanium shape memory alloys on surface roughness and MRR”, *Life Science Journal*, 9(4): 2904-2909 (2012).
58. Bisaria H., Shandilya P., “Study on effect of machining parameters on performance characteristics of Ni-rich NiTi shape memory alloy during wire electric discharge machining”, *Materials Today: Proceedings*, 3316–3324 (2018).
59. Theisen, W., Schuermann, A., “Electro discharge machining of nickel–titanium shape memory alloys”, *Materials Science and Engineering A*, 378(1-2): 200-204 (2004).
60. Rasheed, M. S., Al-Ahmari, A., El-Tamimi, A. M., Abidi, M. H., “Analysis of influence of micro-EEI parameters on MRR, TWR and Ra in machining Ni-Ti shape memory alloy”, *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 1(4): 32-37 (2012).
61. Gaikwad, V., Jatti, V. S., Singh, T. P., “Electric discharge machining of cryo-treated NiTi alloys”, *Applied Mechanics and Materials*, 787: 366-370 (2015).
62. Ceritbinmez, F., Kanca, E., “The effects of cutting parameters on the kerf and surface roughness on the electrode in electro erosion process”, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(2): 335-346 (2021).

63. Reddy, D., Soni, H., Narendranath, S., “Experimental investigation and optimization of WEEI process parameters for Ti50Ni48Co2 shape memory alloy”, *MaterialsToday: Proceedings*, 5(9): 19063-19072 (2018).
64. Lin, H. C., Lin, K. M., Cheng, I. S., “The electro-discharge machining characteristics of TiNi shape memory alloys”, *Journal of Materials Science*, 36(2): 399-404 (2001).
65. Jamaluddin, R., Tan, C. L., Hamidon, R., Mansor, A. F., Azmi, A. I., “Electrical discharge coating of NiTi alloy in deionized water”, *MaterialsToday: Proceedings*, 41: 109-115 (2021).
66. Chaudhari, R., Vora, J. J., Patel, V., Lopez de Lacelle, L. N., Parikh, D. M., “Surface analysis of wire-electrical-discharge-machining-processed shape-memory alloys”, *Materials*, 13(3): 530 (2020).
67. Kulkarni, V. N., Gaitonde, V. N., Hadimani, V., Ailholi, V., “Analysis of wire EEI process parameters in machining of NiTi superelastic alloy”, *Materials Today: Proceedings*, 5:(9), 19303-19312 (2018).
68. Zhu, Z., Guo, D., Xu, J., Lin, J., Lei, J., Xu, B., Wu, X., Wang, X., “Processing characteristics of micro electrical discharge machining for surface modification of TiNi shape memory alloys using a TiC powder dielectric”, *Micromachines (Basel)*, 11(11): 1018 (2020).
69. Sharma, N., Gupta, K., “Wire spark erosion machining of NI rich niti shape memory alloy for bio-medical applications”, *Procedia Manufacturing*, 35: 401-406 (2019).
70. Liu, J. F., Guo, Y. B., “Process capability of wire-EEI of NiTi shape memory alloy at main cut and trim cut modes”, *Procedia Manufacturing*, 1: 904-914 (2015).
71. Daneshmand, S., Kahrizi, E. F., Lotfineyestanak, A. A., “Optimization of electrical discharge machining parameters for NiTi shape memory alloy by using the Taguchi method”, *Journal of Marine Science and Technology*, 22:(4), 506-512 (2014).
72. Altas, E., Gökkaya, H., Altın Karataş, M., Özkan, D., “Analysis of surface roughness and flank wear using the taguchi method in milling of NiTi shape memory alloy with uncoated tools”, *Coatings*, 10(12): 1259 (2020).
73. Alidoosti, A., Nazari, A. G., Moztafzadeh, F., Jalali, N., Moztafzadeh, S., Mozafari, M., “Electrical discharge machining characteristics of nickel-titanium shape memory alloy based on full factorial design”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24:(13), 1546-1556 (2013).

74. Masmiati, N., Sarhan, A. A. D., “Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress–Taguchi approach”, *Measurement*, 60: 267-275 (2015).
75. Kam, M., İpekçi, A., Argun, K., “Experimental investigation and optimization of machining parameters of deep cryogenically treated and tempered steels in electrical discharge machining process”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(5): 1927-1935 (2022).
76. Engin, N., Akıncıoğlu, S., “Kriyojenik işlem görmüş nikel esaslı süper alaşımın elektro-erozyon işleme performansı optimizasyonu”, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1): 115-126 (2019).
77. Kalyon, A., “Elektro erozyon ile işlemede yüzey pürüzlülüğünün ve iş parçası işleme hızının taguchi tekniği ile optimizasyonu”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(62): 595-605 (2019).
78. Gaikwad, M. U., Krishnamoorthy, A., Jatti, V. S., “Investigation and optimization of process parameters in electrical discharge machining (EEİ) process for NiTi 60”, *Materials Research Express*, 6(6): 065707 (2019).
79. Singh, R., Singh, R. P., Trehan, R., “Surface integrity and accuracy based aspects in EEİ of Cu-based SMA: An experimental investigation with microstructural analysis”, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-14 (2022).
80. Ziolkowski, A. “Pseudoelasticity of shape memory alloys: theory and experimental studies 1st Edition”, *Butterworth-Heinemann*, 15-32 (2015).
81. Engin, N., Zurnacı, E., Yıldırım, S., “Sertleştirilmiş AISI H13 takım çeliğinin delme performansını iyileştirmek için elektro erozyon işleme parametrelerinin taguchi yöntemi kullanılarak modellenmesi ve optimizasyonu”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2): 99-110 (2021).

ÖZGEÇMİŞ

Metehan YILMAZ ilk ve orta öğrenimini Nurdağı'nda, lise eğitimini OPET Anadolu Lisesi'nde, lisans eğitimini Bingöl Üniversitesi Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı.