



**YÜZEY KAPLAMASI UYGULANMIŞ AZ31
ALAŞIMININ DARBELİ AŞINMA
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Safa DERELİOĞLU

Danışman: Prof. Dr. Recep SADELER

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2024

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**YÜZEY KAPLAMASI UYGULANMIŞ AZ31 ALAŞIMININ DARBELİ AŞINMA
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Impact Wear Behaviors of AZ31 Alloy with Surface Coating Applied)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Safa DERELİOĞLU

Danışman: Prof. Dr. Recep SADELER

Erzurum
Ocak, 2024



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**YÜZEY KAPLAMASI UYGULANMIŞ AZ31 ALAŞIMININ DARBELİ AŞINMA
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

Prof. Dr. Recep SADELER danışmanlığında, Mehmet Safa DERELİOĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma, 29/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (X/...)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Yaşar TOTİK

Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Danışman: Prof. Dr. Recep SADELER

Atatürk Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ATASOY

Giresun Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim

Kurulunun .../.../.... tarih

ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Graduate School of Natural and
Applied Sciences

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Recep SADELER danışmanlığında sunulan “Yüzey Kaplaması Uygulanmış AZ31 Alaşımının Darbeli Aşınma Davranışlarının Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	9	30
Kuramsal Temeller	27	30
Materyal ve Metot	4	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	1	20
Sonuçlar ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	12	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Mehmet Safa DERELİOĞLU	Prof. Dr. Recep SADELER
29.1.2024	29.1.2024
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŐEKKÖR

Bu araştırma sürecinde her konuda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım kıymetli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Recep SADELER'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım süresince birçok konuda bana yardımcı olan doktora öğrencisi Sayın İbrahim YURDGÖLÜ'ne, Sayın Fatma Nur HORASAN'a ve ayrıca Sayın Dr. Sedanur KELEŐ'e, Sayın Dr. Hasan YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte desteğini esirgemeyen ailem, dostlarım ve sevdiklerime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Safa DERELİÖÖLU



ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ
YÜZEY KAPLAMASI UYGULANMIŞ AZ31 ALAŞIMININ DARBELİ AŞINMA
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI
Mehmet Safa DERELİOĞLU

Danışman: Prof. Dr. Recep SADELER

Amaç: Magnezyum ve alaşımları, diğer yapısal metallere göre sahip oldukları üstün avantajlarına rağmen sürekli darbeler altında düşük darbe dayanımı nedeniyle kullanım alanları kısıtlıdır. Magnezyumun bu dezavantajı, tekrarlanan darbeler karşısında malzemenin aşınmasına ve sistemin bozulmasına neden olabilir. Magnezyum ve alaşımlarının bu dezavantajını iyileştirmek ve endüstride kullanımını arttırmaya yönelik AZ31 alaşımına ince film kaplamalar uygulanacaktır. Kaplama yapılan numunelere, tasarlanan deney cihazıyla farklı parametrelerde darbe aşınmaları uygulanarak, meydana gelen aşınmaların malzemede yaratacağı etkinin araştırılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Çalışma üç ana aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada Magnezyum AZ31 taban malzeme yüzeyine DC güç kaynağıyla saçırma biriktirme yöntemiyle MoTi, CrMo, Ti, Pd hedefleriyle PVD ince film kaplamalar yapılmıştır. PVD kaplama yapılarak alaşım malzemesi üzerindeki aşınma direnci artırılması amaçlanmıştır. İkinci aşamada darbeli aşınma test cihazı kullanılarak numunelere darbe testleri gerçekleştirildi. Kaplanan numunelerin hava ortamında dinamik yüklemelere karşı oluşan darbe direncini araştırmak için tekrarlı darbeler uygulanmıştır. Darbe elemanı olarak çelik bilyeler kullanılmıştır. Üçüncü adımda ise darbe testi uygulanan numunelerin ve bilyelerin analiz edilip, yorumlanması ve kıyaslanması yapılmıştır.

Bulgular: Darbeler sonucunda yüzeyde oluşan aşınma izleri, darbe elemanı olan çelik bilyenin geometrik yapısında ve mikroyapısında değişiklikler meydana gelmiştir. Numuneler üzerinde oluşan darbe izleri de rahatça görülmektedir. Farklı parametrelerde uygulanan darbe testlerinde farklı yapılar oluşmuştur. Tekrarlanan darbeler sonrasında oluşan aşınma izlerinin ortalama çapları ve ortalama derinlikleri ölçülmüş ve SEM, EDS görüntü ve analizleri alınmıştır.

Sonuç: Darbe elemanının şekli nedeniyle tüm numunelerde yüzey hasarı görülmüştür. Çarpma frekansı arttıkça daha fazla aşınma kaybı meydana geldi. Aşınma mekanizması temas anında sürtünmeden dolayı kopma, parçalanma ve delaminasyon şeklindeydi.

Anahtar Kelimeler: aşınma, darbeli aşınma, magnezyum, AZ31, pvd kaplamalar, magnetron sputter

Ocak 2024, 77 sayfa

ABSTRACT
MASTER THESIS
INVESTIGATION OF IMPACT WEAR BEHAVIORS OF AZ31 ALLOY WITH
SURFACE COATING APPLIED

Mehmet Safa DERELİOĞLU

Supervisor: Prof. Dr. Recep SADELER

Purpose: Despite their superior advantages over other structural metals, magnesium and its alloys have limited usage areas due to their low impact resistance under continuous impacts. This disadvantage of magnesium may cause wear of the material and failure of the system in the face of repeated impacts. Thin film coatings will be applied to the AZ31 alloy to improve this disadvantage of magnesium and its alloys and increase its use in industry. It was aimed to investigate the effect of the wear on the material by applying impact wear at different parameters to the coated samples with the designed test device.

Method: The study consists of three main stages. In the first stage, PVD thin film coatings were made on the Magnesium AZ31 substrate surface with MoTi, CrMo, Ti, Pd targets by sputtering deposition method with DC power supply. It is aimed to increase the wear resistance on the alloy material by applying PVD coating. In the second stage, impact tests were carried out on the samples using an impact wear test device. Repeated impacts were applied to investigate the impact resistance of the coated samples against dynamic loading in the air environment. Steel balls were used as impact elements. In the third step, the samples and balls subjected to the impact test were analyzed, interpreted and compared.

Findings: The wear marks formed on the surface as a result of impacts caused changes in the geometric structure and microstructure of the steel ball, which is the impact element. Impact marks on the samples are also clearly visible. Different structures were created in impact tests applied with different parameters. The average diameters and average depths of the wear marks resulting from repeated impacts were measured, and SEM and EDS images and analyzes were taken.

Results: Due to the shape of the impact element, surface damage was seen in all samples. As the impact frequency increased, more wear loss occurred. The wear mechanism was in the form of rupture, fragmentation and delamination due to friction at the time of contact.

Keywords: wear, impact wear, magnesium, AZ31, pvd coatings, magnetron sputter

January 2024, 77 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları	3
PVD Kaplamalar	6
Manyetik Alanda Sıçratma (Magnetron Sputter)	7
Malzemelerin Aşınma Davranışları	8
Darbeli Aşınma (Impact Wear).....	9
MATERYAL VE METOT	11
Taban Malzemenin Hazırlanması	11
Magnetron Sputter Kaplama İşlemi	12
Darbeli Aşınma Deneyleri.....	14
Yapısal Analizler.....	16
ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR.....	18
Darbeli Aşınma Deneyleri.....	18
Darbe Aşınması Deneyleri Aşınma İzi Profil Yapıları	18
Darbeli Aşınma Deneyleri Aşınma İzi Morfolojisi.....	35
SEM-EDS Analizleri.....	38
SONUÇLAR.....	60
KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	64

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Magnezyum Elementinin Fiziksel Özellikleri	3
Tablo 2. Magnezyum Elementinin Yapısal Özelliklerinin Bazı Metaller İle Kıyaslanması	4
Tablo 3. AZ31 Alaşımının Oda Sıcaklığındaki Fiziksel Özellikleri	5
Tablo 4. Taban Malzemesi Olan AZ31 Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu	11
Tablo 5. AZ31 Alaşımı Numunelerine Uygulanacak Kaplamalar.....	12
Tablo 6. Magnetron Sputter Kaplama Parametreleri	13
Tablo 7. Kabin İçerisindeki Vakum Değişimleri.....	13
Tablo 8. Aşınma Deneylerinde Kullanılan Parametreler	15



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Magnezyum, alüminyum, çelik ve titanyum metallerinin (a) ağırlık ve (b) mukavemetlerinin kıyaslanması.....	4
Şekil 2. Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi.....	8
Şekil 3. Darbeli aşınma testi sonucunda darbe elemanının malzemede oluşturduğu hasar	10
Şekil 4. Mitutoyo SJ-210 marka portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	11
Şekil 5. NANOVAK NVTS-400 marka ince film kaplama sistemi.....	12
Şekil 6. MTI Corporation-GSL-1500X marka tavlama fırını	14
Şekil 7. Kaplama sonrası tavllanmış numuneler	14
Şekil 8. Darbeli aşınma testlerinde kullanılan test cihazı.....	15
Şekil 9. Bruker-Contour GT marka 3D profilometre cihazı	16
Şekil 10. Zeiss Sigma 300 marka SEM görüntüleme cihazı	17
Şekil 11. JEOL-JSM 6510 marka SEM cihazı	17
Şekil 12. Kaplamasız 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	19
Şekil 13. MoTi kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	19
Şekil 14. CrMo kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	20
Şekil 15. Ti kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	21
Şekil 16. Pd kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	22
Şekil 17. 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunelerin hacim kayıpları.....	22
Şekil 18. Kaplamasız 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	23
Şekil 19. MoTi kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	24
Şekil 20. CrMo kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	25
Şekil 21. Ti kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	25
Şekil 22. Pd kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	26

Şekil 23. 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunelerin hacim kayıpları.....	27
Şekil 24. Kaplamasız 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	27
Şekil 25. MoTi kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	28
Şekil 26. CrMo kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	29
Şekil 27. Ti kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	29
Şekil 28. Pd kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	30
Şekil 29. 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunelerin hacim kayıpları.....	31
Şekil 30. Kaplamasız 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	31
Şekil 31. MoTi kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	32
Şekil 32. CrMo kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	33
Şekil 33. Ti kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	33
Şekil 34. Pd kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü.....	34
Şekil 35. 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunelerin hacim kayıpları.....	35
Şekil 36. Kaplamasız numunelerin darbeli aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	36
Şekil 37. MoTi kaplamalı numunelerin darbeli aşınma sonrası SEM görüntüleri.....	36
Şekil 38. 2,5 ve 5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde numunelerin SEM görüntüleri	37
Şekil 39. 2,5 ve 5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde numunelerin SEM görüntüleri	38
Şekil 40. Kaplamasız 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü.....	39
Şekil 41. MoTi 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü	40
Şekil 42. Kaplamasız 5 Hz. frekansta 10^4 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü.....	42
Şekil 43. MoTi 5 Hz. frekansta 10^4 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü.....	43
Şekil 44. Kaplamasız 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü.....	45
Şekil 45. MoTi 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü	46
Şekil 46. Kaplamasız 5 Hz. frekansta 10^5 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü.....	48
Şekil 47. MoTi 5 Hz. frekansta 10^5 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü	49

Şekil 48. Çelik bilyenin kaplamasız numuneye 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü.....	51
Şekil 49. Çelik bilyenin MoTi kaplamalı numuneye 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü	52
Şekil 50. Çelik bilyenin kaplamasız numuneye 5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü.....	53
Şekil 51. Çelik bilyenin MoTi kaplamalı numuneye 5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü	54
Şekil 52. Çelik bilyenin kaplamasız numuneye 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü.....	55
Şekil 53. Çelik bilyenin MoTi kaplamalı numuneye 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü	56
Şekil 54. Çelik bilyenin kaplamasız numuneye 5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü.....	57
Şekil 55. Çelik bilyenin MoTi kaplamalı numuneye 5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μ	: Ortalama sürtünme katsayısı
μm	: Mikrometre
A	: Amper
Å	: Ångström
A/cm²	: Akım yoğunluğu
BÜMLAB	: Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi
cP	: Viskozite
CrMo	: Krom Molibden
CVD	: Chemical Vapor Deposition - Kimyasal Buhar Biriktirme
DAYTAM	: Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
EDX-EDS	: Energy Dispersive Spectrometry - Enerji Dağıtıcı X-Işını
gr/cm³	: Yoğunluk
HB	: Brinell sertliği
Hz	: Hertz
J	: Joule
MoTi	: Molibden Titanyum
N	: Newton
nm	: Nanometre
°C	: Santigrad derece
PVD	: Physical Vapor Deposition - Fiziksel Buhar Biriktirme
Ra	: Yüzey pürüzlülüğü
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
SEM	: Scanning Electron Microscope - Taramalı Elektron Mikroskobu
V	: Voltaj
YÜTAM	: Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
Ω	: Ohm

GİRİŞ

Magnezyum elementi doğada bol miktarda bulunan elementlerdendir. Magnezyum, endüstriyel uygulamalarda çelik ve alüminyumdan sonra en sık kullanılan hafif metallerden biridir. Bu element, çeliğin yaklaşık olarak dörtte biri ve alüminyumun ise üçte biri kadar yoğunluğa sahip olmasından dolayı ulaşım araçları, elektronik aletler vb. gibi birçok endüstriyel alanda kullanımı mükemmel sonuçlar vermektedir (Eroğlu 2022).

Magnezyum ve alaşımları; hafiflik, özgül dayanım, kolay işlenebilirlik ve biyouyumluluk gibi sahip oldukları özellikleriyle otomotiv (jant, kapı kilidi gövdesi, iç kapı kolları, debriyaj gövdesi, yanma odaları, silindir kapağı vb.), havacılık (hidrolik deposu ve yakıt deposu vb.), uzay (uydu ve uzay mekiği sistemleri vb.), biyomedikal (implant) ve elektronik sektörlerinde yaygın olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir (Çelik 2019). Örneğin; BMW, Volkswagen, Mercedes-Benz, Mitsubishi, Porsche ve Chevrolet gibi otomotiv firmaları araç gövdelerinde, motor bloğunda, şanzımanda, direksiyon millerinde, koltuk iskeletlerinde, yakıt deposu kapaklarında ve birçok parçada magnezyum kullanmaktadır. BMW'nin R6 olarak adlandırdığı motorunda, krank kutusu, kam kapağı parçaları alüminyum alaşımlı magnezyumdan üretilmiş ve benzer motorlardan 10 kg hafiflik sağlanmıştır (Eroğlu 2022). Ancak magnezyum ve alaşımlarının, düşük aşınma direnci sebebiyle sektörlerde kullanım alanları kısıtlıdır. Bu nedenler, yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olmasına rağmen magnezyum ve alaşımlarının kullanım alanları için dezavantaj oluşturmaktadır.

Magnezyumun hafif yapısal metal olması nedeniyle otomotiv ve havacılık endüstrisinde yakıt tasarrufu ve buna bağlı olarak düşük gaz emisyonu sağlamaktadır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları ile çalışması hedeflenen otomobiller için hafifliğin önemi oldukça fazladır. Otomobillerde sıkça kullanılan alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımlarından 4 kat daha ağırdır. Alüminyum ve alaşımları ile kıyaslandığında magnezyum ve alaşımlarının düşük aşınma direnci olmasına rağmen özgül ağırlık ve işlenebilirlik çok daha iyidir. Ağırlık miktarının önemli olduğu hava, kara araçlarında magnezyum ve alaşımlarının geliştirilmesi büyük bir ihtiyaçtır.

Magnezyum ve alaşımlarının dezavantajları, bir yüzey koruması olmadan sektörlerde kullanılmalarını kısıtlamaktadır. Bu problemi çözmek için yüzey kaplama işlemleri yapılarak

malzemenin sürtünme, aşınma gibi faktörlere karşı korunması ve bu faktörlere dayanıklılığının artırılması hedeflenmektedir.

Günümüzde sertlik, aşınma ve korozyon dirençlerinin artırılması amacıyla malzemenin yüzeyine ince film kaplamalar yaygın olarak tercih edilmektedir. İnce film kaplama yöntemi olan PVD kaplamalar, kolay uygulanabilirlik, kaplanacak taban malzemenin mikro yapısına zarar vermemesi, ölçüsel tolerans değişikliğine ihtiyaç duyulmaması vb. zellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Atomik düzeyde gerçekleşen ince film kaplamaların kalınlığı 0,01-10 μm arasındadır. PVD kaplamalar, hedef malzemelerin vakum ortamında buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomların hedef malzeme yüzeyinden kopartılması ve kaplama yapılacak taban malzeme yüzeyine atomsal veya iyon sal olarak birikmesiyle gerçekleşir (Aytaç ve Malayoğlu 2018).

Malzeme yüzeyi, tekrar eden mekanik darbelerden dolayı hasar görebilir ve aşınmaya uğrayabilir. Bu aşınma, darbe aşınması olarak adlandırılır. Darbe aşınması, mekanik sistemin tekrar eden darbeler sonucunda zaman içinde yıpranmasına sebep olabilir. Tekrarlı mekanik darbeler, özellikle malzemelerin yüzeylerinde hasar bırakır. Yük taşıma kapasitesi, yorulma dayanımı, sürtünme ve aşınma dayanımları vb. gibi bir makine parçasının performansı, yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve indüklenen artık gerilmeler gibi yüzey özelliklerine bağlıdır. Bu sebeple malzemelerin aşınma ve yorulma dirençlerini iyileştirmek için bu faktörlerin kontrol edilmesi gerekir (Pande and Patel 1984).

Magnezyum alaşımı olan AZ31 alaşımının aşınma dayanımını iyiletirebilecek kaplamalar, magnetron sputter yöntemiyle PVD kaplamalar yapılarak darbeli aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Darbeli aşınma test cihazıyla, darbe aınmasının kaplanmamış ve farklı kaplama katmanları uygulanmış AZ31 alaşım malzemesine olan aşınma etkilerinin malzemede nasıl bir etki yaratacağı araştırılmıştır.

KURAMSAL TEMELLER

Magnezyum ve Magnezyum Alaşımları

Magnezyum, kimyasal sembolü Mg olan ve atom numarası 12 olan parlak gümüş beyazı renginde bir elementtir. Toprak alkali metallerden olup doğada bol miktarda bulunan elementlerden biridir (Kainer 2006). Magnezyum elementi, alüminyumdan %33 ve çelikten %70 daha hafiftir bir elementtir. Bu özelliğinden dolayı magnezyum önemli bir alaşım elementidir. Magnezyum elementinin fiziksel özellikleri Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Magnezyum Elementinin Fiziksel Özellikleri (Eroğlu 2022)

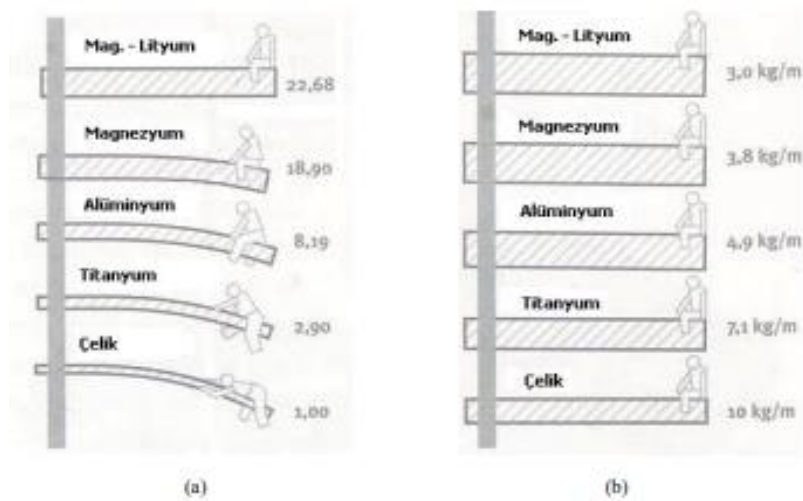
Simgesi	Mg
Atom Numarası	12
Atom Ağırlığı	24,312
Yoğunluğu	1,738 gr/cm ³
Erime Sıcaklığı	650 °C
Kaynama Noktası	1107 °C
Alev Sıcaklığı	2880 °C
Yanma Isısı	25020 kJ.kg ⁻¹
Ergime Isısı	368 kJ.kg ⁻¹
Özgül Isı	1025 J.K ⁻¹ .kg ⁻¹
Buharlaştırma Isısı	5272 kJ.kg ⁻¹
Kristal Yapısı	Hegzagonal sıkı paket
Alev Sıcaklığı	2880 °C
Termal İletkenlik	154 W/m.K (27 °C'de)
Elektrik İletkenliği	22,2 m/ohm.K
Özgül Isı Kapasitesi	1047 K/kg.K
Valans Durumu	Mg ⁺
Sertlik	30-47 HB
Viskozite	1,25 cP (650 °C'de)
Elastisite Modülü	44,5 10 ³ N/mm.mm

Magnezyum elementi bugünkü teknolojinin önemli bir hammaddesidir. Geleceğin metali olarak görülen magnezyum her geçen gün daha fazla değer kazanmaktadır. Endüstriyel alanlarda demir ve alüminyumdan sonra magnezyum en çok kullanılan üçüncü metaldir. Magnezyum alaşımları; dayanıklı ve çok hafif olmasından dolayı otomotiv ve havacılık sanayisinde büyük önem taşır. Ayrıca dizüstü bilgisayar, tablet, cep telefonu, kamera gibi elektronik cihazların üretiminde ve savunma sanayisinde, askeri ekipmanların üretiminde de kullanılır. Tablo 2’de magnezyum elementinin yapısal özelliklerinin diğer metallerle kıyaslanması gösterilmiştir (Car 2019).

Tablo 2. Magnezyum Elementinin Yapısal Özelliklerinin Bazı Metaller İle Kıyaslanması

Özellik	Magnezyum	Alüminyum	Çelik	Titanyum
Sertlik (MNm/kg)	24,4	25,9	27,8	27,1
Yoğunluk (katı) (g/cm ³)	1,73	2,7	7,9	4,4
İşlenebilirlik (kWh/kg)	0,085	0,15	0,54	0,65
Ergime noktası (°C)	650	658	1540	1660

Magnezyumun alüminyum, çelik ve titanyum metallerinin ağırlık – mukavemet ilişkisi Şekil 1’de gösterilmiştir. Aynı uzunluk ve ağırlığa sahip kirişlerin aynı yük altında, maruz kaldıkları eğilmeler soldaki şekilde (a) gösterilmektedir. Buna göre magnezyum, çeliğe göre 18,90 kat daha dayanıklıdır. Sağda gösterilen şekilde (b) ise aynı uzunluk ve aynı mukavemetteki kirişler karşılaştırılmıştır. Buna göre, çelik 10 kg/m iken magnezyum 3,8 kg/m’dir (Car 2019).



Şekil 1. Magnezyum, alüminyum, çelik ve titanyum metallerinin (a) ağırlık ve (b) mukavemetlerinin kıyaslanması

Ağırlık miktarının az olmasının istendiği durumlarda magnezyum en iyi tercihlerden biridir. Ancak magnezyum bu sistemlerde tek başına kullanılamamaktadır. Bu nedenle alaşım elementleriyle birlikte kullanılır. Otomotiv endüstrisinde her 100 kg ağırlık hafiflemesi 100 km'de 0,5 litre yakıt tasarrufu ve %5 daha az CO² emisyonu sağlamaktadır. Yakıt pillerinin kullanımının artması ve hibrit teknolojiye geçiş ile birlikte otomotiv endüstrisinin öncelikleri arasında magnezyum ve alaşımlarının daha fazla kullanımı ile daha hafif ve daha güçlü araçların üretimi de yer almaktadır. Otomotiv endüstrisinde çelik ve dökme demir yerine magnezyum metalinin kullanımı ile araçların %60-75 arasında hafiflemesi sağlanabilecektir. Havacılık sektöründe ise, toplam maliyetin %30-40'ını yakıt maliyetleri oluşturmaktadır. Havacılık sektöründe %20 ağırlık azalışı %10 yakıt tasarrufuna eşdeğerdir. Dolayısıyla havacılık sektöründe hafifliğin önemi oldukça fazladır. Ancak, havacılık sektöründe alüminyumun kullanımı neredeyse üst sınıra gelmiş ve yeni hafif malzemelere gerek duyulmaya başlanmıştır. Fiber malzemeler pahalı ve darbe sönümlemeleri düşüktür, polimer malzemelerin ise mekanik stabiliteleri düşüktür. Bu seçenekler göz önüne alındığında magnezyum diğer malzemelere göre daha düşük maliyetli ve fiziksel ve kimyasal özellikleri ile büyük potansiyele sahip olmasıyla ön plana çıkmıştır. (Car 2019).

Genel olarak, metalik malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için alaşımlama veya yüzey işlemi uygulanır. Magnezyum çeşitli metallerle alaşım oluşturduğunda mekanik özellikleri de iyileşebilir. Bununla beraber mukavemet ve sertliği arttırmanın yanı sıra alaşımın iyi dökülebilirliğini de iyileştirir. Alüminyum içeriği %3 -9 olan ticari Al-Mg alaşımlarında en uygun seviyede mukavemet ve süneklilik özellikleri gösterir. Ayrıca oda sıcaklığında alaşım dayanımını artırmak için çinko sıklıkla alüminyum ile birlikte kullanılmaktadır (Turhan 2012). Örneğin, magnezyum bileşimine %1 çinko eklenmesi, endüstride sıkça kullanılan ve fiziksel özellikleri Tablo 3'te verilen AZ31 alaşımını oluşturur (Duygulu 2009).

Tablo 3. AZ31 Alaşımının Oda Sıcaklığındaki Fiziksel Özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³)	1,78
Özgül Isı (cal/g.°C)	0,25
Solidüs Sıcaklığı (°C)	605
Likidüs Sıcaklığı (°C)	630
Isıl İletkenlik (W/mK)	77
Isıl Genleşme Katsayısı (x10 ⁶)	27

PVD Kaplamalar

Teknolojinin gelişimiyle birlikte havacılık ve uzay sektörlerinin öncülüğünde, yeni malzemelerde üstün mekanik özellikler ihtiyaç haline gelmiştir. İnşaat sektöründeki kaplama malzemelerine benzer şekilde makine, imalat, otomotiv vb. endüstrilerde de istenilen ürün özellikleri kaplama işlemi ile sağlanabilmektedir (Aytaç ve Malayoğlu 2018).

Malzemenin yüzeyine uygulanan kaplamalar, uygulama kalınlığına göre ince film kaplamalar ve kalın film kaplamalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kalınlıkları 0,01-10 µm arasındaki ince film kaplamalarda, kaplamanın yüzeyde birikmesi atomik seviyede meydana gelmektedir. Kalın film kaplamalarda yüzeyde birikme ise büyük kütlelerin transferi ile gerçekleşmektedir (Axen et al. 2000).

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan iki tür buhar biriktirme yöntemi vardır. Bunlar: Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) kaplama yöntemleridir. İnce film kaplamalar, kesici takımlardan kol saatlerine kadar birçok alanda sıkça kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, sert ve tok olmasıyla sürtünme ve aşınma özellikleri gelişmiş malzemelerin üretimini sağlar. Bu kaplama yöntemleri taban malzemenin üzerine 0,01-10 µm arasında kaplama yapılmasını sağlamasıyla birlikte, PVD yöntemi, CVD kaplamaların işlem sıcaklığından dolayı (850-1250 °C) taban malzemenin mikro yapısında meydana getirdiği olumsuz etkileri ortadan kaldırmıştır. İnce film kaplama yöntemi olan PVD kaplamalar, kolay uygulanabilirlik, kaplanacak taban malzemenin mikro yapısına hasar vermemesi, ölçüsel toleransın değişikliğine ihtiyaç duyulmaması vb. özellikleri nedeniyle sıkça tercih edilmektedir (Aytaç ve Malayoğlu 2018).

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemleriyle yapılan ince film kaplamalar, malzemelerin aşınma direncini iyileştiren önemli bir yöntem olmasıyla birlikte uygun kaplama parametreleri belirlendiğinde malzemenin performansını, ticari değerini ömrünü ve etkilemektedir (Huang et al. 2003).

PVD kaplamalar, hedef malzemelerin vakum ortamında sıçratılarak veya buharlaştırılarak atomların hedef malzeme yüzeyinden kopartılmasıyla ve kaplama yapılacak taban malzeme yüzeyine iyon sal veya atom sal olarak birikmesiyle gerçekleşir. Fiziksel buhar biriktirme yönteminde yüksek oranda refrakter kaplama malzemeleri kullanımı, düşük taban malzeme sıcaklıkları ve yüksek enerjili iyon bombardımanını nedeniyle yüksek iç gerilmeler meydana gelmektedir. PVD kaplama yöntemi, refrakter malzemelerin biriktirilmesinde uygun bir yöntemdir (Kusano et al. 1998). PVD kaplama yöntemi, iyonize olmuş metal buharının üretimi, belirli gazlarla reaksiyonu ve taban malzeme yüzeyinde ince bir film tabakası

oluşturarak metal bazlı sert kaplamaların üretilmesi için tercih edilen bir yöntemdir. Tüm PVD kaplama işlemleri yüksek vakum şartlarında gerçekleştirilir. Kaplamalar; tekli, çoklu ve kademeli katmanlar halinde de gerçekleştirilebilir (Aytaç ve Malayoğlu 2018).

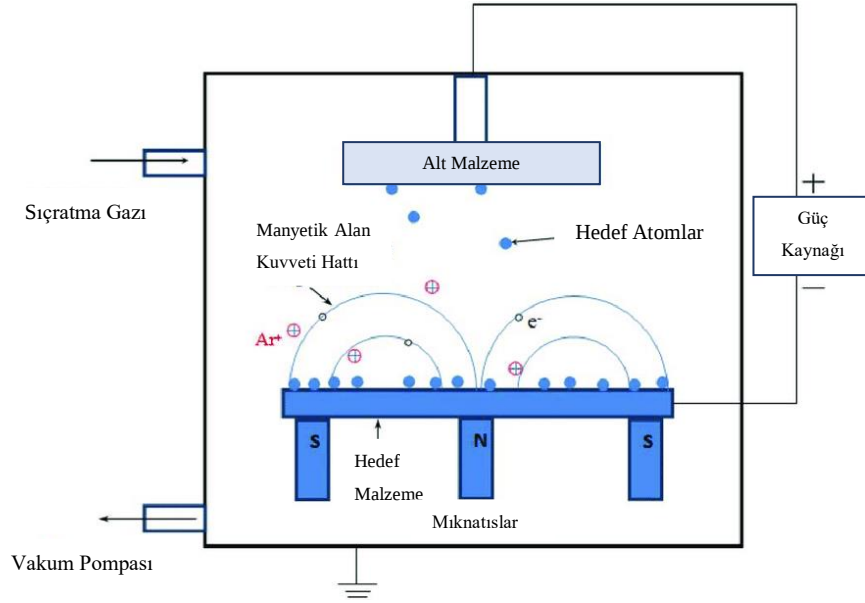
PVD teknikleri üç ana gruba ayrılabilir:

- 1) Buharlaştırma,
- 2) Plazma oluşturma,
- 3) Sıçratma.

Bu tekniklerin farkları ise; farklı yöntemlerle buharlaştırmanın yapılması veya kaplanacak olan malzemeye vakum odasına göre negatif potansiyel uygulama ve plazma kullanımı gibi farklı uygulamalardır. Farklı kaplama teknikleriyle yapılan kaplamanın özellikleri, birikme hızı ve yapısı gibi parametreler önemli ölçüde etkilenmektedir (Bunshatta 1980).

Manyetik Alanda Sıçratma (Magnetron Sputter)

Manyetik alanda sıçratma yöntemi PVD ince film kaplamalarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu kaplama işleminde, katot yüzeyinde paralel olarak oluşturulan manyetik alan elektron tuzakları oluşturur ve katoda yaklaşan elektron hareketini kısıtlar. Manyetik alan kuvveti birkaç gauss kadardır ve bu alan, plazma elektronlarını etkiler, ancak iyonları etkileyemez. Manyetik alan çizgisinde yakalanan elektronlar manyetik alandan anota yönelir veya çarpışma yaparak altlığa doğru ilerler. Bu iyonlaşma mekanizması yüksek verimi sebebiyle yüksek akım ve düşük voltaj değerlerinde çalıştırılabilir (Özet 2008). Sonuçta yüksek malzeme koparma hızı elde edilir. Şekil 2’de manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi

Malzemelerin Aşınma Davranışları

Aşınma mekanizmaları, sürtünme esnasında meydana gelen kompleks değişikliklere bağlı olarak tanımlanmaktadır. Aşınma genelde tek bir aşınma mekanizması süresince yer almamaktadır. Aşınma, kimyasal bozulma veya mikro çatlamadan dolayı fiziksel ayrılma olarak, malzemenin kaldırılması sonucunda gerçekleşmektedir. Aşınma, farklı fiziksel mekanizmalara göre çeşitli tiplere ayrılabilir. En yaygın aşınma tipleri şunlardır (Yıldız ve Gür 2006):

- Adhezif aşınma: Temas halindeki iki yüzeyin temas ara yüzeyinde kayma direnci için yapışkan gücüne sahip olmasıyla, plastik deformasyonunun sıkıştırma ve kırılma altında temas bölgesi içinde oluşmasıyla aşınma meydana gelir ve bu durum temas ara yüzeyinde çatlama neden olmaktadır. Temas ara yüzeyindeki bu çatlak, aşınan parça, yapışkan transferinin tamamlanmasıyla şekillenmektedir. Yeterli yapışma meydana geldiğinde bu aşınma tipi oluşmaktadır.
- Abrasif aşınma: İki yüzey arasındaki temas ara yüzeyi meyilli bir temasa sahipse, aşınma bu kayma içerisinde yer almasıyla gerçekleşir. Abrasif aşınma, sert partiküllerinin veya sert çıkıntılarının katı bir yüzey boyunca hareket etmesi ve karşı direncinden dolayı oluşur.
- Yorulma aşınması: İki parça arasındaki temasın tekrarlı olmasıyla ve bu şekildeki temas dönüşleri sonrası meydana gelen aşınmalar yorulma aşınması olarak adlandırılır.
- Tribokimyasal aşınma: Malzemenin yüzeyinde kimyasal reaksiyonların veya korozyonun etkisiyle oluşan yüzey hasarıdır. Bu yüzeylerde parlama veya kemirilme oluşur.

Aşınmalar, malzeme seçimi, yüzey işlemleri, ısıtma işlemi, kaynak, yağlama gibi yöntemlerle önlenmeye veya azaltılmaya çalışılabilir.

Darbeli Aşınma (Impact Wear)

Bir malzemenin, başka bir gövde tarafından çekiçleme yöntemi ile tekrarlı temas altında bırakılmasıyla malzemenin yüzeyinde oluşturduğu aşınma darbe aşınması olarak adlandırılır. Darbeye maruz kalan malzemenin yüzeyinde tekrar eden darbeler nedeniyle gerilmeler meydana gelmektedir. Malzemenin özelliklerine göre bu gerilmeler farklı tepkiler gösterebilirler. Örneğin, gevrek malzemeler darbelerle maruz kaldığı temas bölgesinden kırılmaya duyarlıdır. Tekrar eden darbelerin sonucunda malzemelerin üzerinde oluşan hasarlar mekanik sistemin zarar görmesine sebep olabilir. Darbe etkisi sonucunda malzeme yüzeyinden mikron seviyede parçacık uzaklaşması görülmektedir.

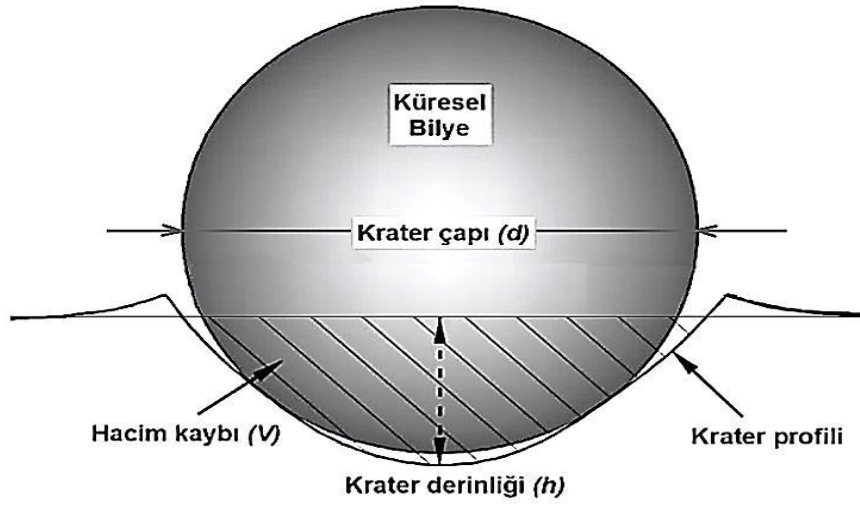
İlk kez Engel 1979 yılında darbeli aşınma üzerinde çalışmalar yapmıştır. Daha sonra Tabor ise darbeli aşınmayı dört aşamaya ayırmıştır. İlk aşamada darbe elemanının darbe etkisiyle malzemenin temas ettiği yüzeylerde elastik deformasyon meydana gelmektedir. İkinci aşamada darbeye maruz kalan malzemeler arasındaki temas arttıkça elastoplastik deformasyon oluşmaktadır. Bu aşamada darbe elemanının üzerine etki eden kuvvetler sonucu kinetik enerjisi tükenir ve bu durum yüzey gerilmelerinin artmasına sebep olur. Üçüncü aşamada darbe elemanının kinetik enerjisinin tükenmesi ve yüzey gerilmelerinin artmasıyla elastoplastik deformasyon, plastik deformasyona dönüşür. Bu aşamada malzemelerin yüzeylerinde ve yüzey altı parçalarında mikroyapılarda değişiklikler meydana gelmektedir. Yüzey ile darbe elemanı arasındaki elastik gerilmelerin serbest kalmasıyla birlikte son aşama tamamlanmış olur.

Darbeler nedeniyle yüzeyde oluşan hasarlar aşınma bozulması ve plastik deformasyon olmak üzere iki türde etkiye neden olur. Malzemenin aşınma direnci, makinenin ömrünü uzatmak için oldukça önemlidir. Aşınma nedeniyle malzemede ileride ortaya çıkabilecek durumlardan kaçınmak için yüzey korunması uygulanması gerekmektedir. Yüzey koruma işlemlerinin uygulanması parçaların darbe ve aşınmaya karşı dirençlerini artırır.

Üreticiler, makinenin ömrü ve verimli çalışması için aşınmaya karşı dayanımı yüksek malzemeler tercih etmektedirler. Malzemelerin dayanımlarını ve aşınmaya karşı dirençleri çeşitli testler ile test edilir. Testler sonucu malzemelerin gerekli dirence sahip olabilmesi için çeşitli işlemler yapılmaktadır.

Darbeli aşınma testinde, düz bir numuneye sert bir bilyenin tekrarlı teması sağlanarak dinamik yükleme altında tribolojik sistem serisi test edilir. Bu test, iş parçasının darbe aşınması direnci, plastisitesi, tokluğu ve kaplamanın taban malzemeye yapışma mukavemeti gibi

değerleri test etmeye izin verir (Knotek et al. 1992; Bantle and Mathews 1995; Veovedin et al. 1995; Heinke et al. 1995). Darbe aşınması deneyi sonucunda malzeme ve bilye profiline ait temsili çizim Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Darbeli aşınma testi sonucunda darbe elemanının malzemede oluşturduğu hasar (Slatter et al. 2011)

Bu kaplamalarda, darbe bölgesinde oluşan kayma gerilmeleri kraterin yığılma bölgesinin dışında çatlak oluşumlarına neden olur. Kaplamalarda bu aşınma bölgesinde darbelere bağlı bir ara bölge oluşmaktadır.

Darbeli aşınma testlerinde kullanılan parametreler, darbe kuvveti ile enerjisi, darbe frekansı, çevrim sayısı, çarpma hızı, çarpma açısı, darbe elemanının malzemesi, darbe elemanının şekli ve iş parçası malzemesi olarak belirlenmiştir. Sistemin kinetik enerjisi ya da momentumu arttıkça darbenin şiddeti de artmaktadır (Engel 1979). Robinson and Davies (1992) farklı kütledeki darbe elemanlarının çarpma performansını büyük ölçüde etkilemediğini ve çarpma hızının etkin parametre olduğunu belirttiler. Bouzakis et al. (2012) aynı maksimum kuvvet etkisinde çarpma süresi arttığında iş parçası yüzeyindeki hacim/ derinlik kaybı oranının arttığını gördüler.

MATERYAL VE METOT

Taban Malzemenin Hazırlanması

Yüzeyine kaplama yapılacak taban malzeme olarak, Tablo 4'te kimyasal değerleri gösterilen magnezyum alaşımı olan AZ31 alaşımı seçilmiştir. 14x14x5 mm ebatlarında kesilmiş olan taban malzeme yüzeyine uygulanacak kaplamanın yüzeye daha iyi tutunması için sırasıyla P1200 ve P2400 su zımparalarıyla zımparalanarak kaplama öncesi pürüzlülük değerleri $Ra \approx 0,1$ ile $0,5 \mu m$ arasında değişen değerlere düşürülmüştür. Taban malzemelerin yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 4'te gösterilen “Mitutoyo SJ-210” marka portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür.

Tablo 4. Taban Malzemesi Olan AZ31 Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu

Element	Al	Zn	Fe	Cu	Si	Mn	Mg
% Ağırlık	3,069	1,133	0,019	0,001	0,131	0,486	Kalan



Şekil 4. Mitutoyo SJ-210 marka portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

Magnetron Sputter Kaplama İşlemi

AZ31 alaşımı taban malzemelere PVD ince film kaplama işlemleri için DC güç kaynağıyla manyetik alanda sıçratma (magnetron sputter) yöntemiyle kaplamalar yapılmıştır. AZ31 taban malzemesi üzerine uygulanacak kaplamalar Tablo 5’te belirtilen şekilde, her grupta 4’er numune olacak şekilde planlanarak uygulandı. Bu kaplamalarda magnezyumun aşınma direncini iyileştirmeye yönelik 4 farklı kombinasyonda kaplama tercih edildi. Bu tercihlerde AZ31 taban malzemenin aşınma direncini arttırmak için Tablo 5’te gösterilen ilk ve son katman hedef malzemeler belirlendi. Bu kaplama işlemleri, Şekil 5’te gösterilen BÜMLAB’da bulunan “NANOVAK NVTS-400” marka ince film kaplama sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Kaplama süreci yüksek vakum altında ve koruyucu gaz olarak inaktif gaz olan argon gazı ile gerçekleştirildi. Manyetik alanda sıçratma kaplama işlemleri sırasında kullanılan parametreler Tablo 6’da belirtilen şekilde uygulandı.

Tablo 5. AZ31 Alaşımı Numunelerine Uygulanacak Kaplamalar

	1.Grup	2.Grup	3. Grup	4. Grup
1.Katman	Molibden	Krom	Paladyum	Titanyum
2.Katman	Titanyum	Molibden	-	-



Şekil 5. NANOVAK NVTS-400 marka ince film kaplama sistemi

Tablo 6. Magnetron Sputter Kaplama Parametreleri

Kaplama Kalınlığı (1 Katman)	1 kÅ (100 nm)
Kaplama Hızı	1-1,8 Å/s
Kaplama Süresi	10 dk
Güç Kaynağı	DC
Voltaj	275-325 V
Akım	0,17-0,37 A
Koruyucu Gaz	Argon
Basınç	28-30 mbar
Vakum	10 ⁻² Torr
Kabin Sıcaklığı	30 C°
Numune Tablası Dönüş Hızı	8 rpm

Kaplama işleminin aşamaları şu şekilde gerçekleştirildi:

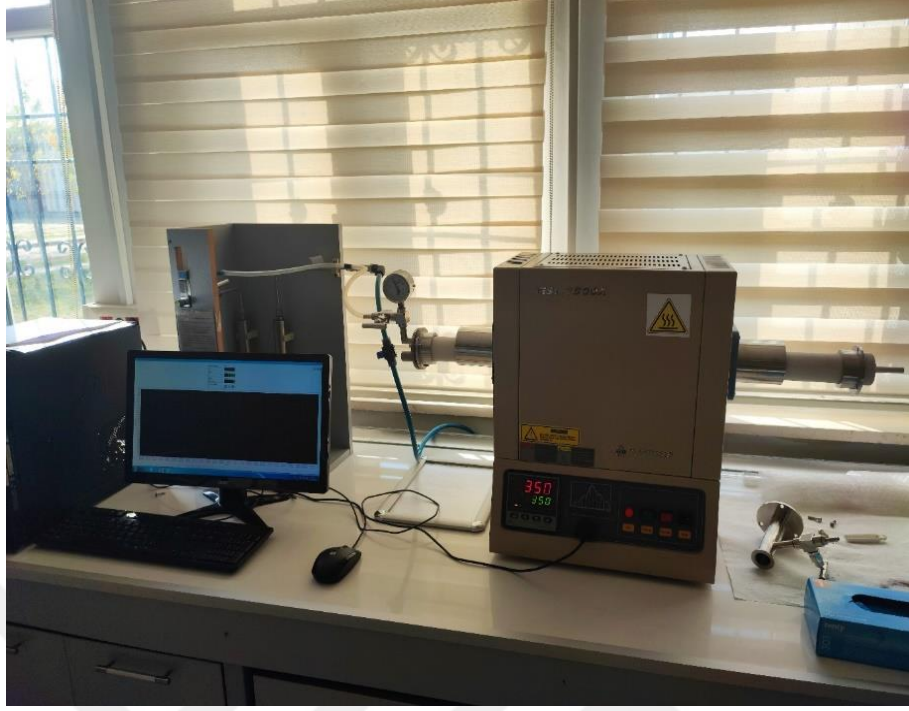
- Su zımparasıyla yüzey parlatma işlemi yapılan AZ31 taban malzemeleri saf su ile yıkandı ve asetona koyularak ultrasonik temizlik cihazında 5 dakika bekletildikten sonra numuneler etanole koyularak ultrasonik temizlik cihazında 5 dakika daha bekletildi. Bu işlemten sonra numuneler azot gazı ile kurutuldu.
- Temizlenen AZ31 taban malzemeler ve planlanan hedef malzemeler kaplama sisteminde bulunan kabindeki tutucularına yerleştirildi ve kabin kapağı kapatıldı.
- Sistemin çalıştırılmasıyla başlangıçta kabinde bulunan atmosferik ortam basıncı vakumlanır, kabin basıncı belli bir seviyeye geldikten sonra kabin içerisine argon gazı akışı sağlanır. Kabin içerisindeki değerlerin değişimi Tablo 7’de verilmiştir. Kabin içinde 1. vakum ortamı sağlandığında kabin içerisine argon gazı verilmeye başlandı ve 2. vakum ortamında kaplama işlemleri gerçekleştirildi.

Tablo 7. Kabin İçerisindeki Vakum Değişimleri

	Atmosfer Ortamı	1. Vakum Ortamı	2. Vakum Ortamı
Basınç (mmHg)	760 Torr	10 ⁻⁶ Torr	10 ⁻² Torr
Basınç (mb)	1024 mbar	4,5 mbar	28-30 mbar

- Taban malzemeye uygulanan her katman sonrasında numunelere tavlama işlemi uygulanarak kaplama malzemesinin taban malzemeye daha iyi tutunması sağlandı. Tavlama işlemleri, 350 °C’ de 15 dakika argon gazı altında tavlanarak gerçekleştirildi. Tavlama

işlemleri için BÜMLAB’da bulunan Şekil 6’daki “MTI Corporation-GSL-1500X” marka tavlama fırını kullanıldı. Kaplama sonrası tavllanmış numuneler Şekil 7’deki durumdadır.



Şekil 6. MTI Corporation-GSL-1500X marka tavlama fırını

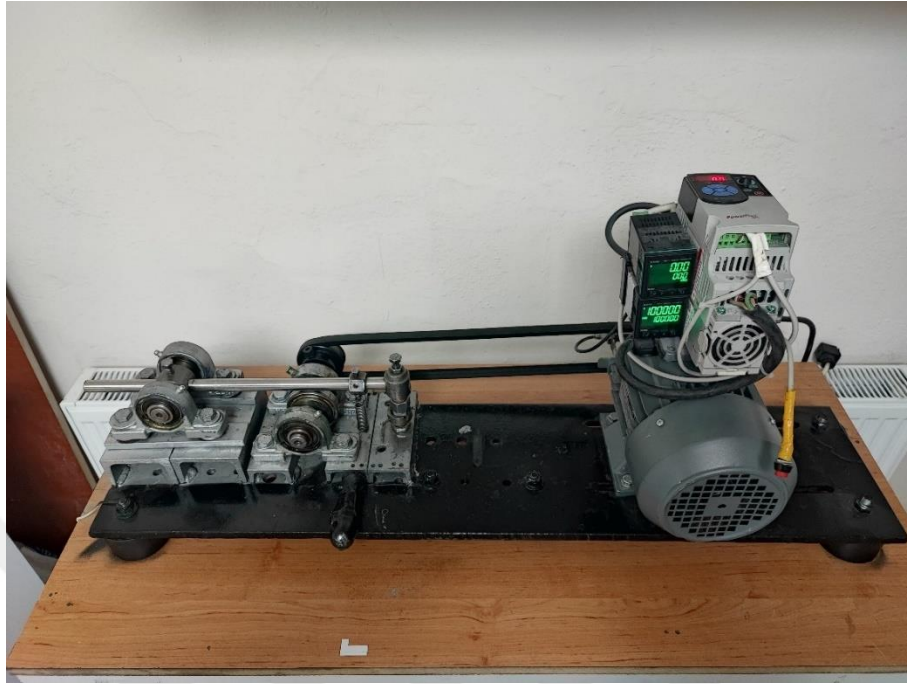


Şekil 7. Kaplama sonrası tavllanmış numuneler

Darbeli Aşınma Deneyleri

Kaplama yapılan numunelerin, hava ortamında dinamik yüklemeler altında darbeli aşınma direncini incelemek için numunelere darbe testleri yapıldı. Bu darbe testleri için Atatürk Üniversitesi’nde bulunan Şekil 8’deki darbe test cihazı kullanıldı. Darbe test cihazı, değişken

frekanslı elektrik motoruna bağı olan bir mil ile salınım hareketi yapan bir test cihazıdır. Bu test cihazı, yükleme hızı, darbe açısı, tekrarlı yükleme sayısı, maksimum darbe kuvveti gibi değişkenlere sahiptir.



Şekil 8. Darbeli aşınma testlerinde kullanılan test cihazı

Deneyler hava ortamında ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Çarpma için darbe elemanı olarak 13,5 mm çapındaki paslanmaz çelik bilyeler kullanıldı. Çalışma frekansı 2,5 Hz. ve 5 Hz. olarak, çarpma açısı olarak 90° ve çevrim sayıları olarak 10⁴ ve 10⁵ belirlendi. Cihazın kalibresini yapmak ve numunelere uygulanacak darbenin kuvvetini tespit etmek için Omega Lckd-250 yük hücresi kullanıldı. Darbe aşınması deneyleri sırasında kullanılan parametreler Tablo 8’de verilmiştir. (Horasan 2023)

Tablo 8. Aşınma Deneylerinde Kullanılan Parametreler

Çalışma Frekansı	5 Hz.	2,5 Hz.
Çarpma Hızı	349 mm/s	174 mm/s
Çarpma Kuvveti	560 N	280 N
Çarpma Enerjisi	0,12 J	0,06 J
Darbe Açısı	90°	90°
Çevrim Sayısı	10 ⁴ ve 10 ⁵	10 ⁴ ve 10 ⁵
Çalışma Ortamı	Hava ortamı	Hava ortamı

Yapısal Analizler

Kaplama sonrası numunelere darbe aşınma testleri uygulandı. Uygulanan darbe testleri sonunda numunelerin yüzeyinde oluşan darbeli aşınma izlerinin krater ölçümleri YÜTAM’ da bulunan “Bruker-Contour GT” marka 3D profilometre cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda AZ31 taban malzemesinin darbe dayanımını iyileştirdiği görülen kaplamaların ve darbe elemanı olan darbe elamanı olan çelik bilyelerin yüzey morfolojisi analizleri DAYTAM’da bulunan taramalı elektron mikroskobu “Zeiss Sigma 300” marka SEM görüntüleme cihazı ve BÜMLAB’da bulunan “JEOL-JSM 6510” marka SEM görüntüleme cihazlarıyla gerçekleştirildi.



Şekil 9. Bruker-Contour GT marka 3D profilometre cihazı



Şekil 10. Zeiss Sigma 300 marka SEM görüntüleme cihazı



Şekil 11. JEOL-JSM 6510 marka SEM cihazı

ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR

Darbeli Aşınma Deneyleri

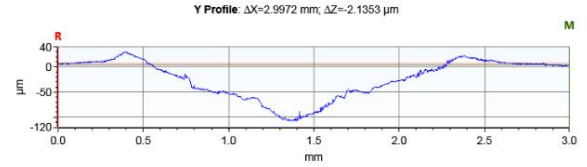
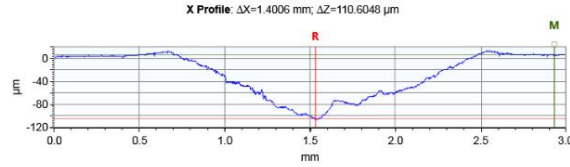
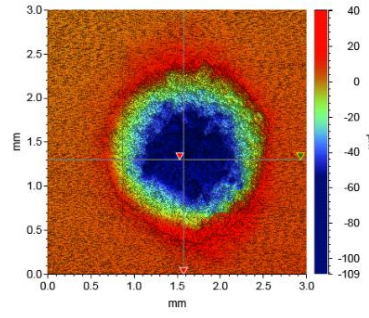
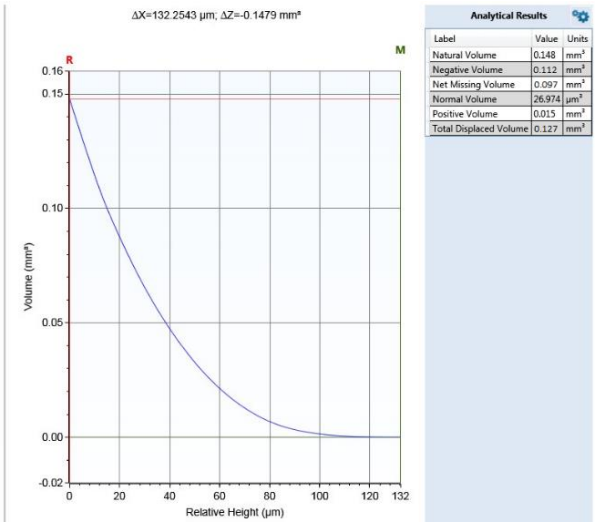
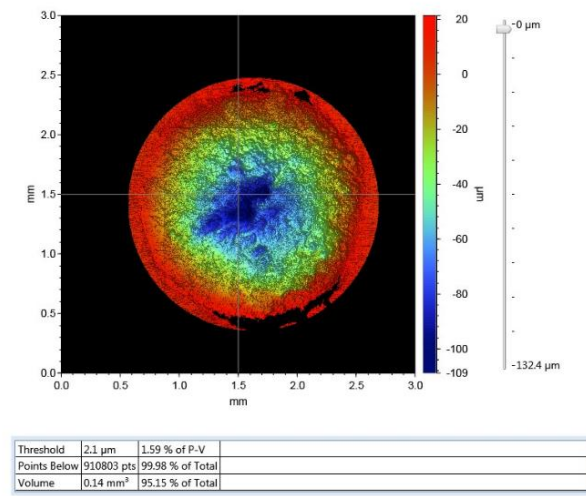
Magnezyum alaşımı olan AZ31 taban malzemesi yüzeyine magnetron sputter yöntemi ile PVD ince film kaplamalar kaplamalar yapılmıştır. Taban malzemelere MoTi, CrMo, Ti, Pd kaplamaları yapılmış ve darbeli aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

Numuneler kaplamasız, MoTi kaplamalı, CrMo kaplamalı, Ti kaplamalı, Pd kaplamalı olmak üzere beş gruba ayrılmış ve bu numunelere 2,5 ve 5 Hz. frekansta hava ortamında darbe deneyleri uygulanmıştır. Bir elektrik motorlu kayış sistemi tarafından tahrik edilen, numune yüzeyi ile belirli bir temas noktasında paslanmaz çelik bilye etkisine karşı darbe aşınma testleri uygulanmıştır.

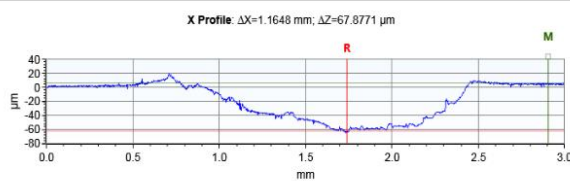
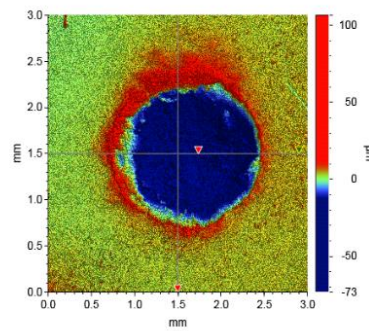
Darbe testleri atmosfer ortamında 2,5 ve 5 Hz. frekans değerlerinde 10^4 ve 10^5 çevrimde vuruş ile gerçekleştirilmiştir. Darbe testleri sonucunda malzemedeki hacim kayıpları YÜTAM’da bulunan 3D profilometre cihazıyla analiz edilerek hesaplanmıştır. Darbe deneylerinin mikro yapı analizlerini yapmak için DAYTAM’dan EDS ve BÜMLAB’dan SEM görüntüleri alınmıştır.

Darbe Aşınması Deneyleri Aşınma İzi Profil Yapıları

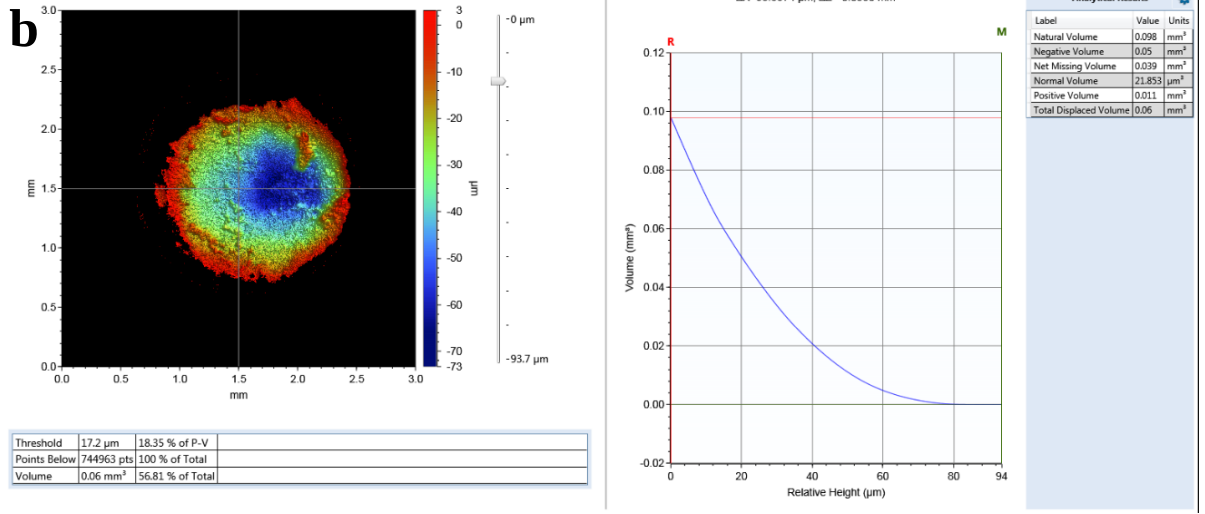
Darbeli aşınma deneyleri sonucunda yüzeyde oluşan aşınma izlerinin morfolojik yapısını tespit etmek için numunelerdeki aşınma izinin merkez eksenini YÜTAM’da bulunan “Bruker-Contour GT” marka 3D profilometre cihazı ile analiz edildi. Kaplamasız ve kaplamalı numunelerin darbe aşınması uygulanan yüzeyinden alınan verilere göre 2,5 Hz. ve 5 Hz. frekansları ve 10^4 ve 10^5 çevrimlerinde uygulanan darbeli aşınma izleri ve hacim kayıpları karşılaştırılmıştır.

a**b**

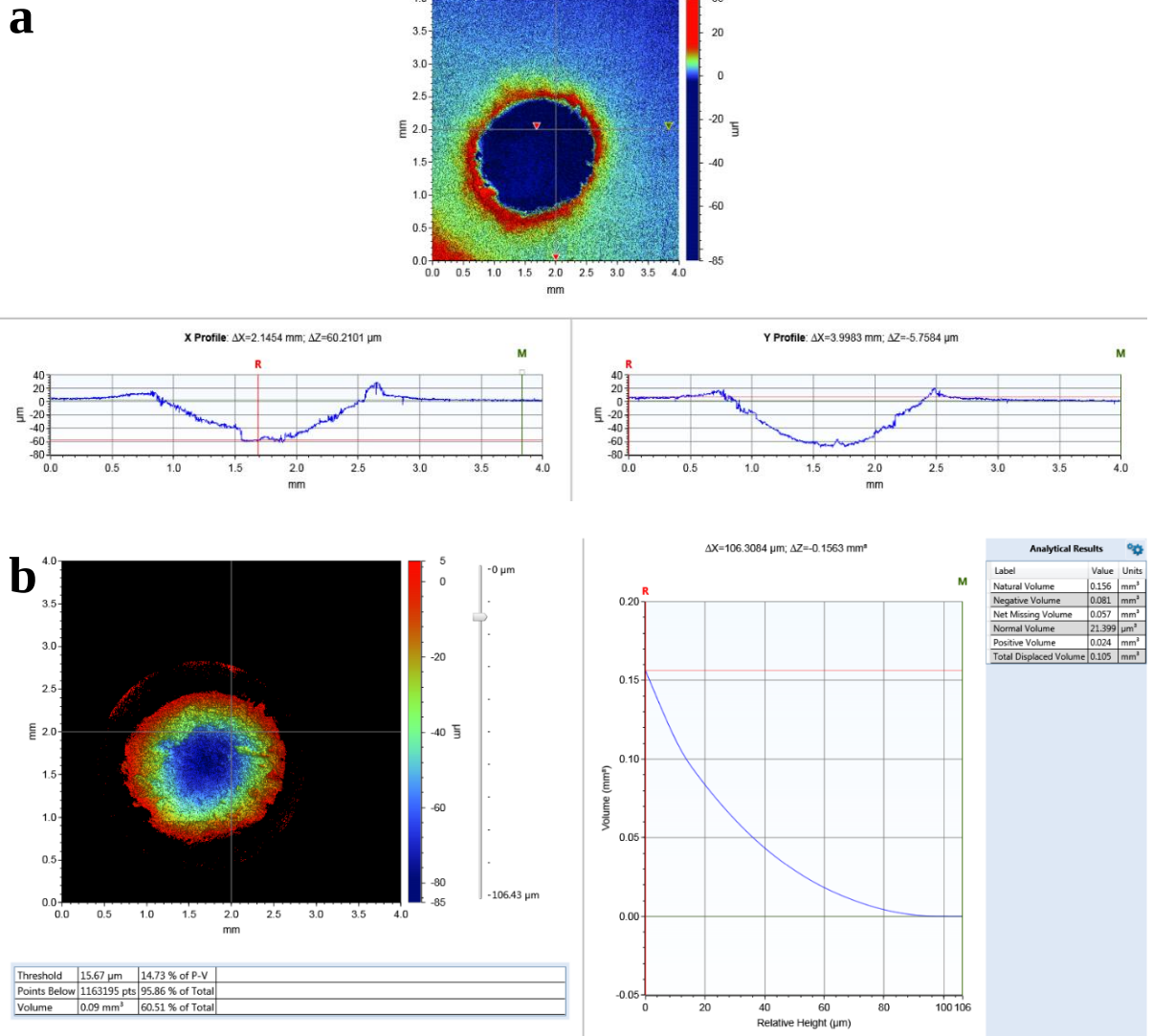
Şekil 12. Kaplamasız 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

a

Şekil 13. MoTi kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

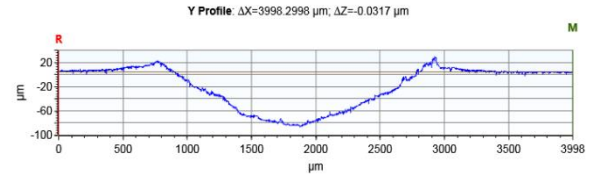
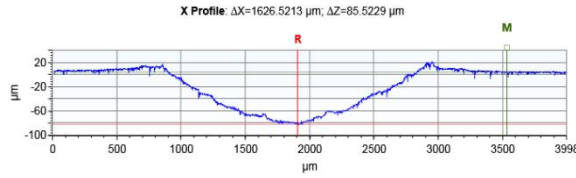
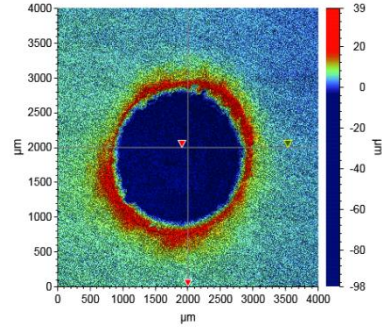


Şekil 13. MoTi kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü (devamı)

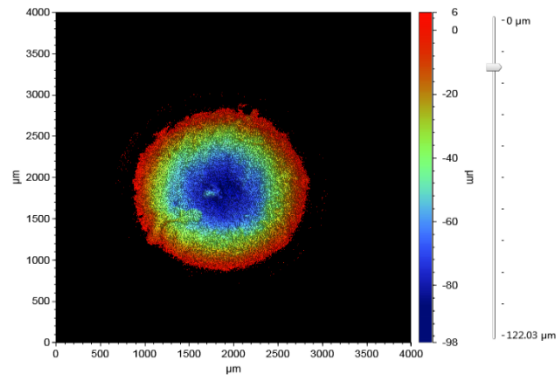


Şekil 14. CrMo kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

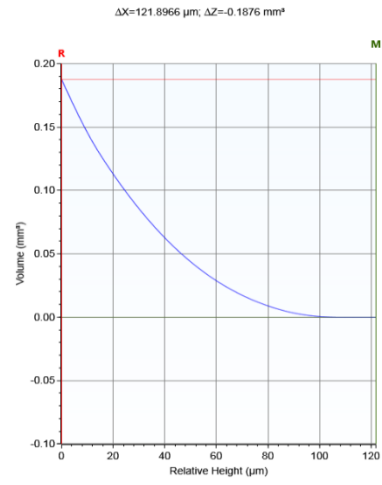
a



b



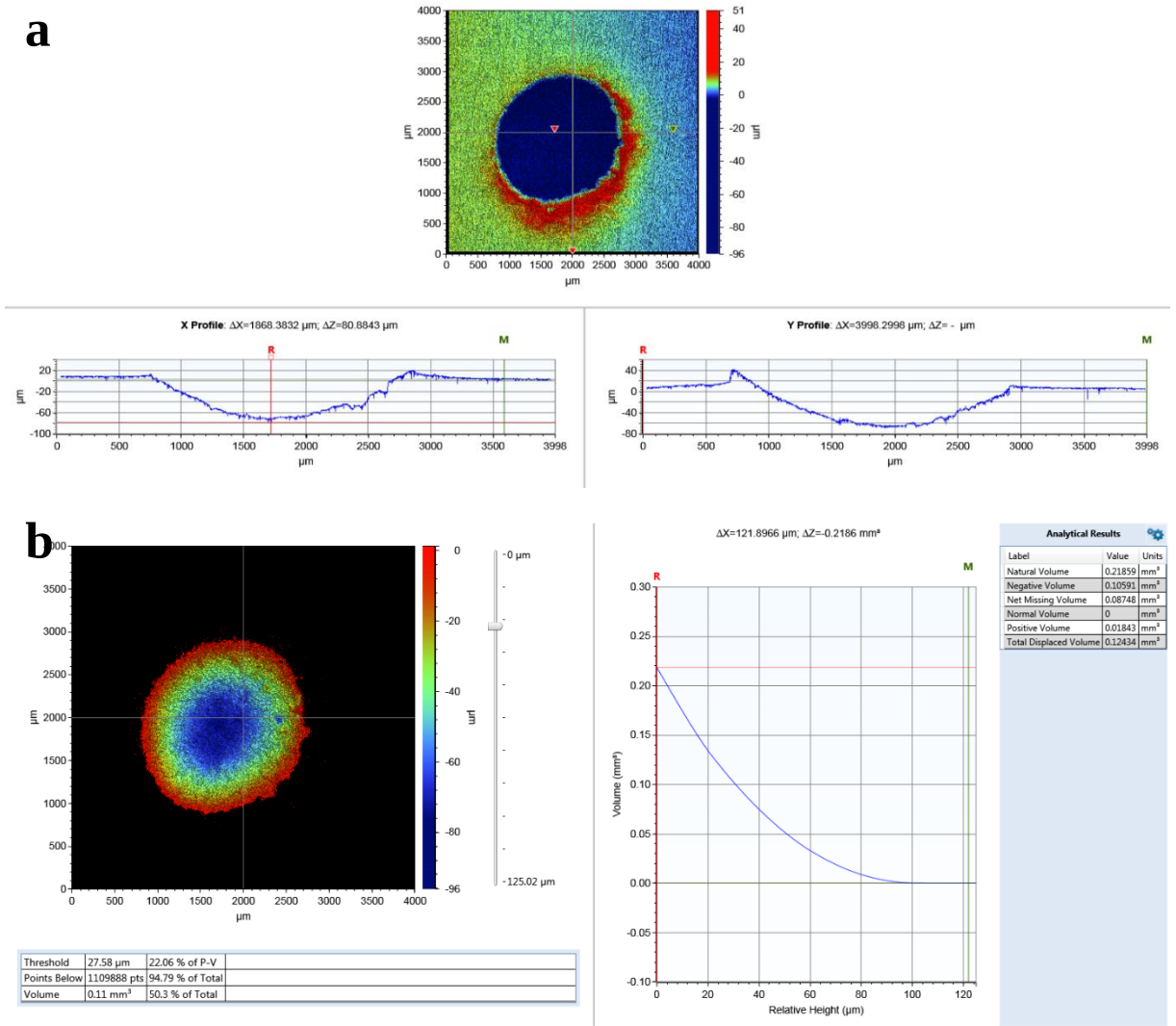
Threshold	18.35 μm	15.03 % of P-V	
Points Below	1075464 pts	91.85 % of Total	
Volume	0.12 mm ³	62.94 % of Total	



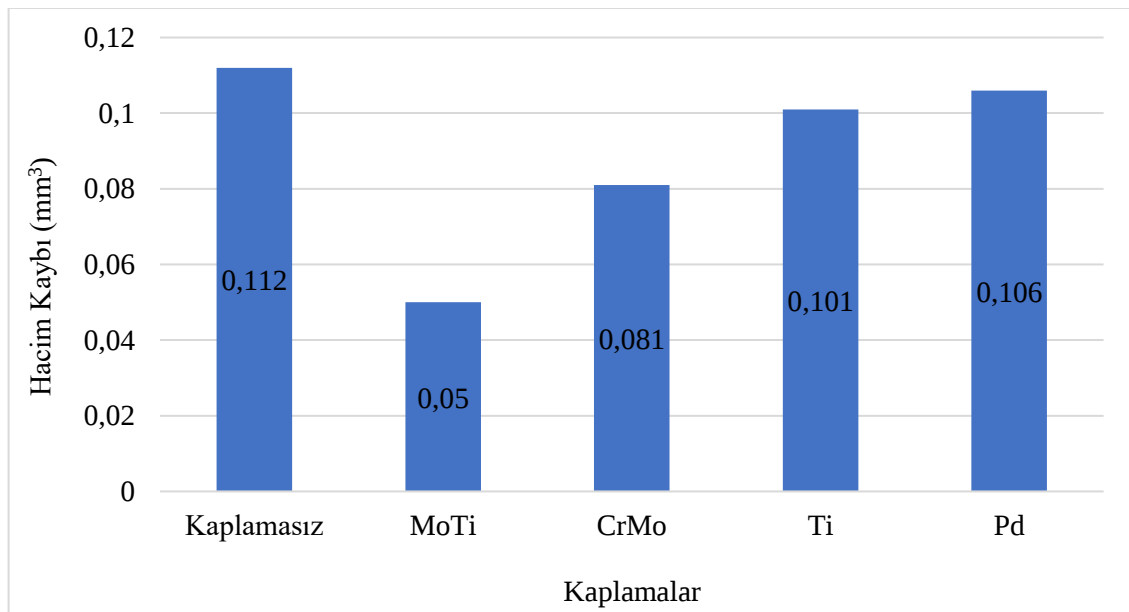
Analytical Results		
Label	Value	Units
Natural Volume	0.18762	mm ³
Negative Volume	0.10149	mm ³
Net Missing Volume	0.07634	mm ³
Normal Volume	0	mm ³
Positive Volume	0.02314	mm ³
Total Displaced Volume	0.12463	mm ³

Şekil 15. Ti kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

a

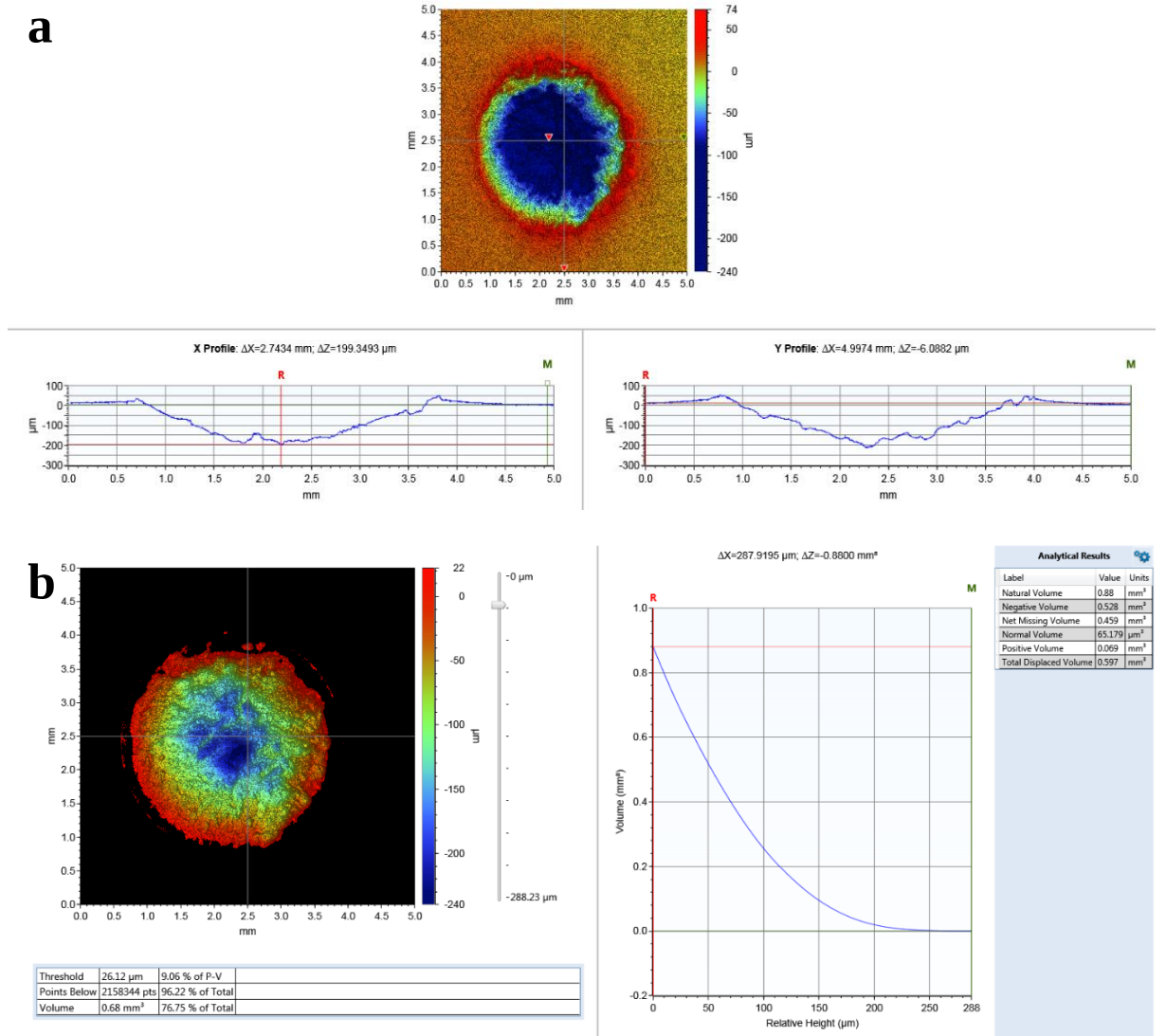


Şekil 16. Pd kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

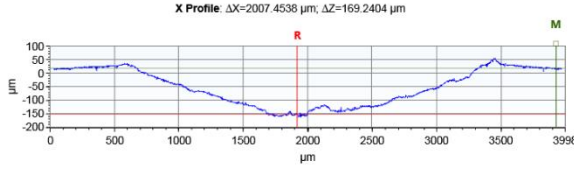
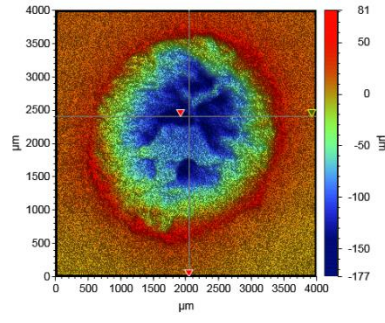
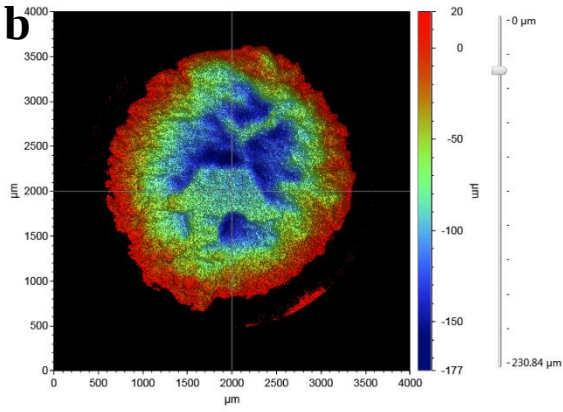


Şekil 17. 2,5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunelerin hacim kayıpları

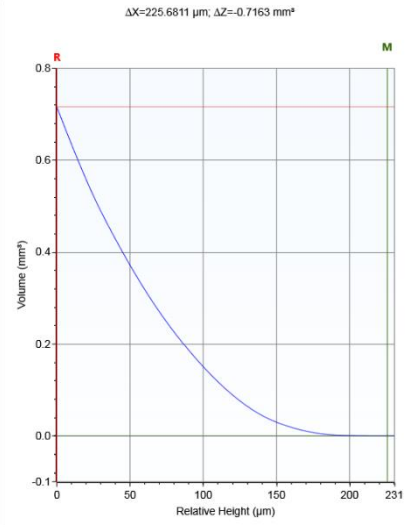
Şekillerdeki 5 farklı numunenin 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde maruz kaldığı darbe aşınma izlerinin 3d profilometre görüntülerine göre tespit edilen hacim kayıplarının karşılaştırılması Şekil 17’de verilmiştir. Buna göre Şekil 12 b’ye bakıldığında kaplama yapılmamış olan AZ31 malzemesine uygulanan darbe aşınması testleri sonucunda numunede $0,112 \text{ mm}^3$ ’lük hacim kaybı oluşmuştur. Şekil 13 b’ye bakıldığında ise MoTi kaplamalı numunede $0,05 \text{ mm}^3$ lük hacim kaybı oluşmuştur. Aynı çevrimde çalışan ve aynı frekans altında kaplamasız ve kaplamalı numuneler karşılaştırıldığında kaplamasız numunenin daha fazla hacim kaybına uğradığı görülmüştür. MoTi kaplamalı numunede ise diğerlerine oranla daha az hacim kaybı olmuştur.



Şekil 18. Kaplamasız 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

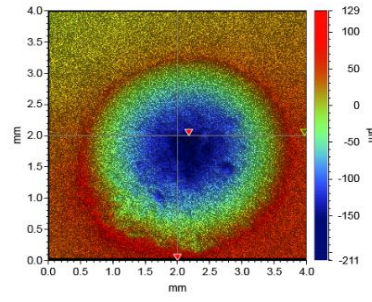
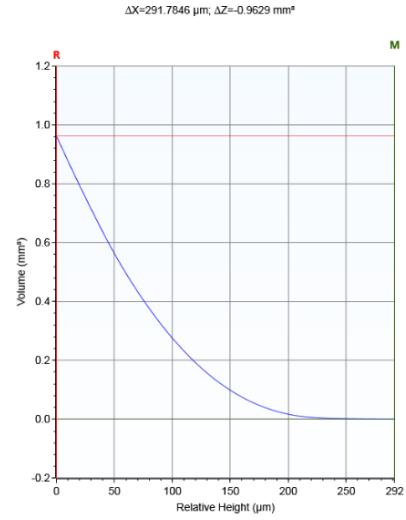
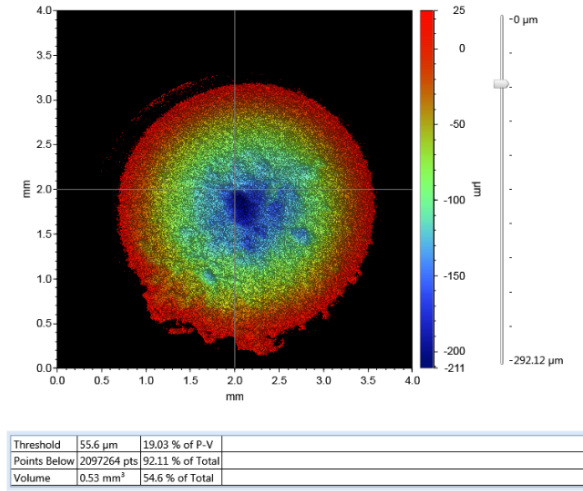
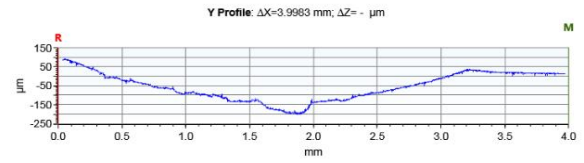
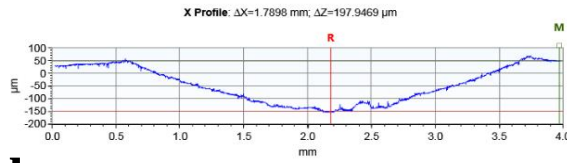
a**b**

Threshold	34 μm	14.73 % of P-V
Points Below	2037506 pts	93.58 % of Total
Volume	0.47 mm ³	65.11 % of Total



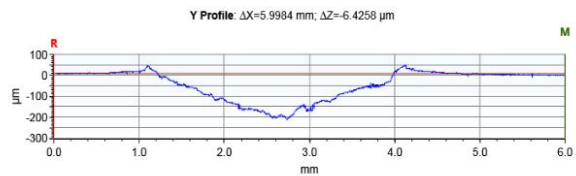
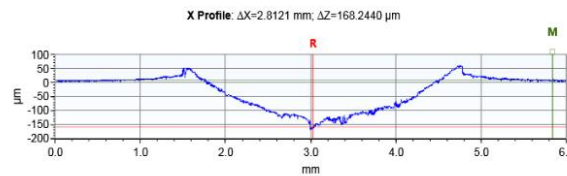
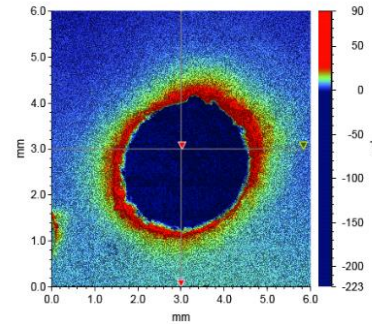
Analytical Results		
Label	Value	Units
Natural Volume	0.71633	mm ³
Negative Volume	0.35109	mm ³
Net Missing Volume	0.26003	mm ³
Normal Volume	0	mm ³
Positive Volume	0.09106	mm ³
Total Displaced Volume	0.44215	mm ³

Şekil 19. MoTi kaplamalı 5 Hz. frekandaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

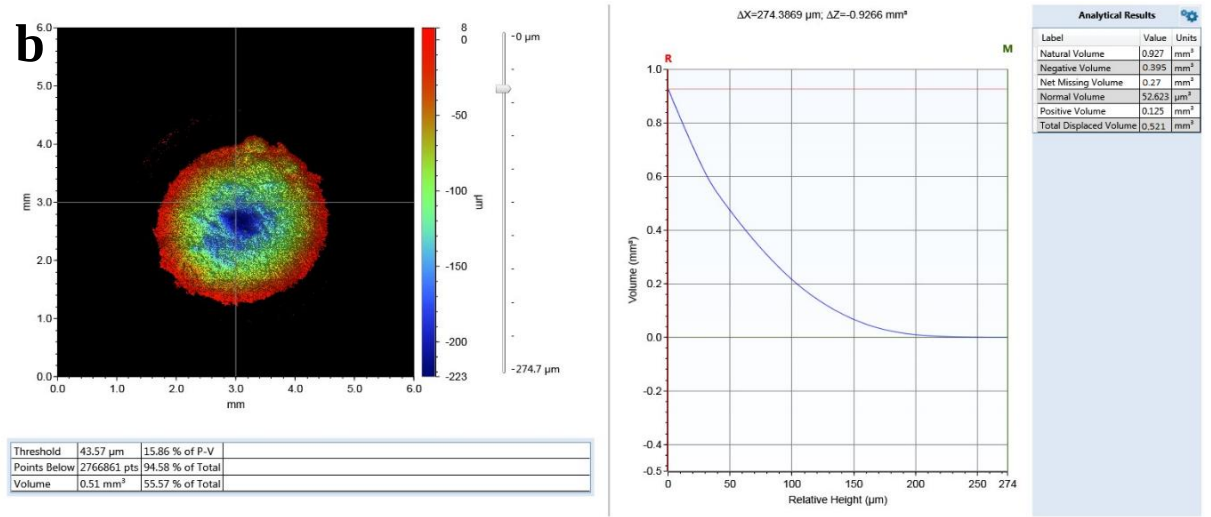
a**b**

Analytical Results		
Label	Value	Units
Natural Volume	0.963	mm ³
Negative Volume	0.371	mm ³
Net Missing Volume	0.247	mm ³
Normal Volume	70.265	μm ³
Positive Volume	0.124	mm ³
Total Displaced Volume	0.496	mm ³

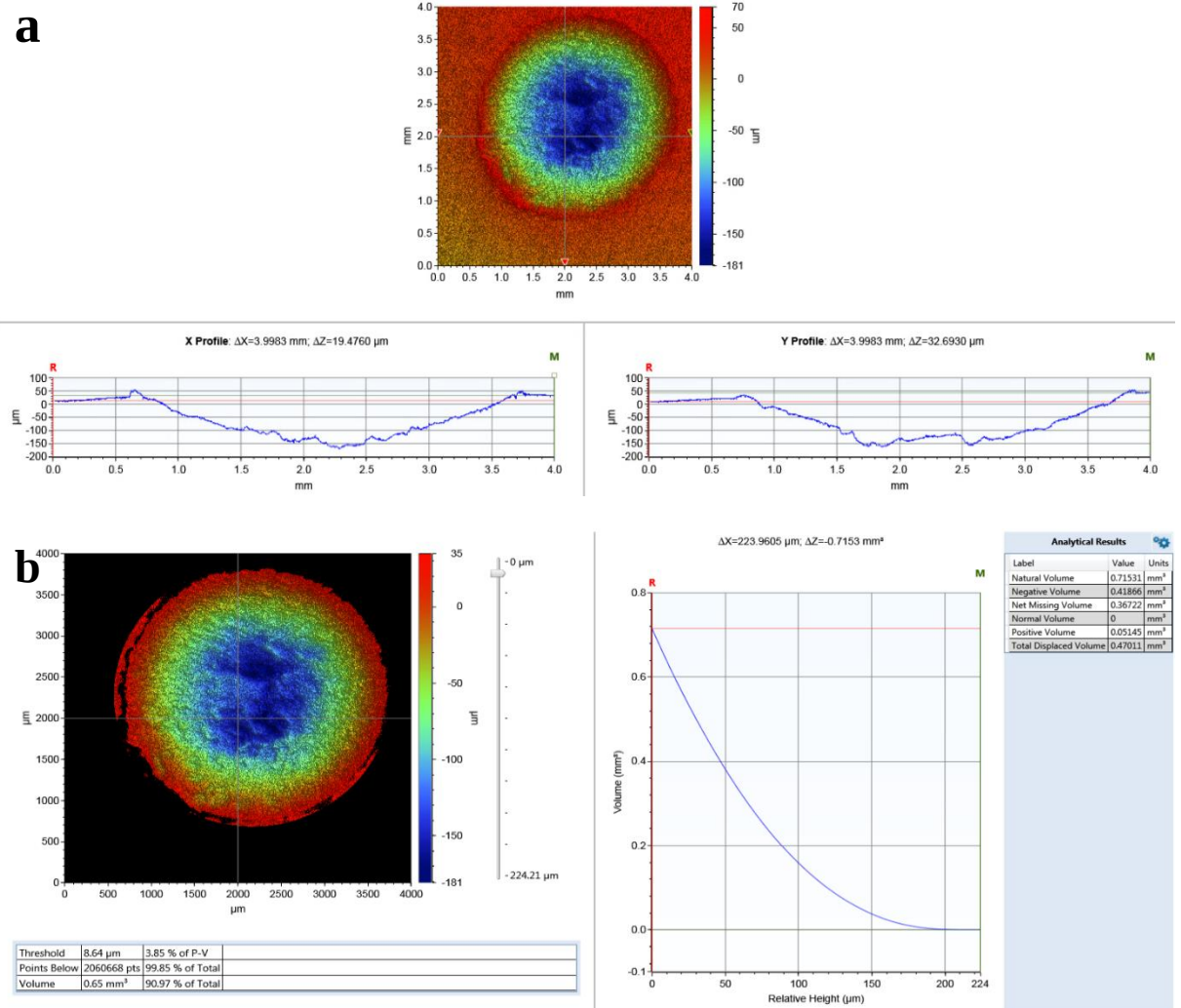
Şekil 20. CrMo kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

a

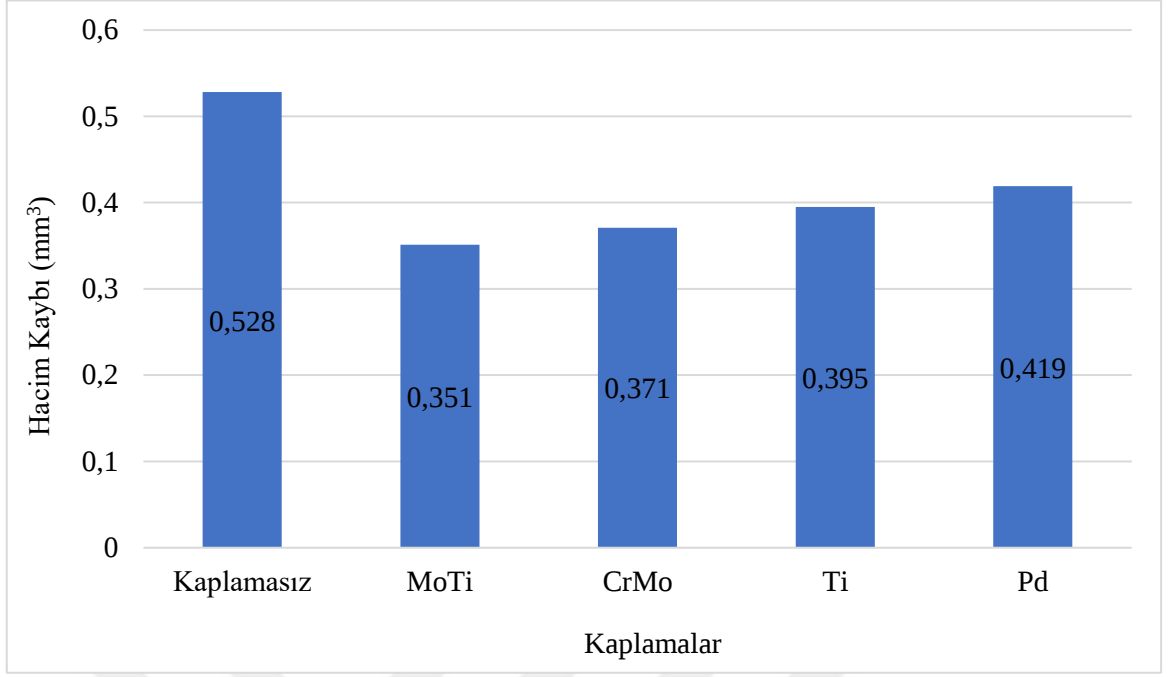
Şekil 21. Ti kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü



Şekil 21. Ti kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü (devamı)



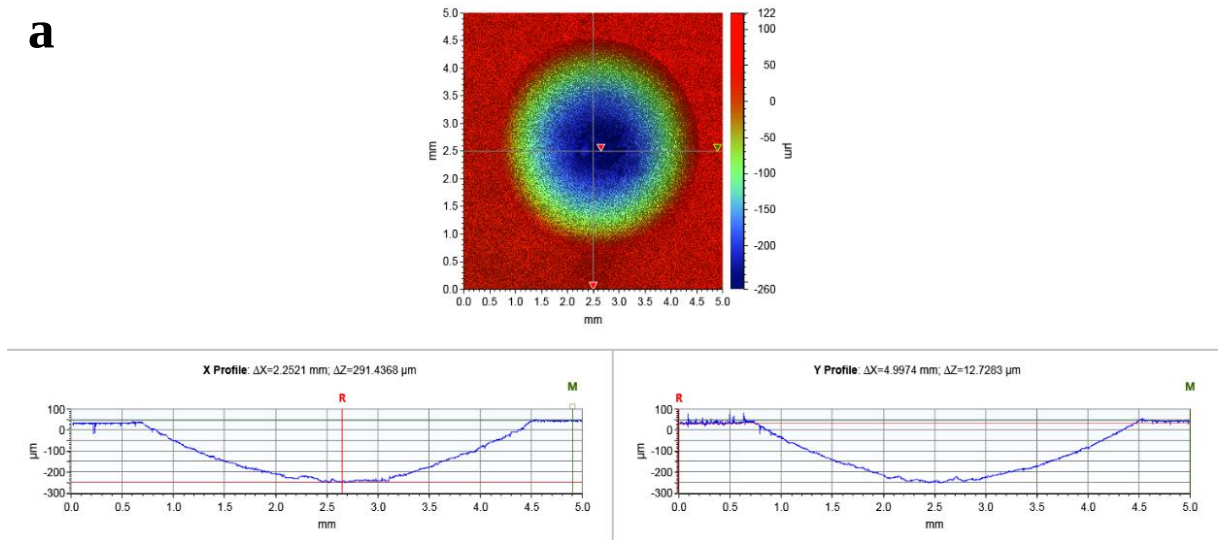
Şekil 22. Pd kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü



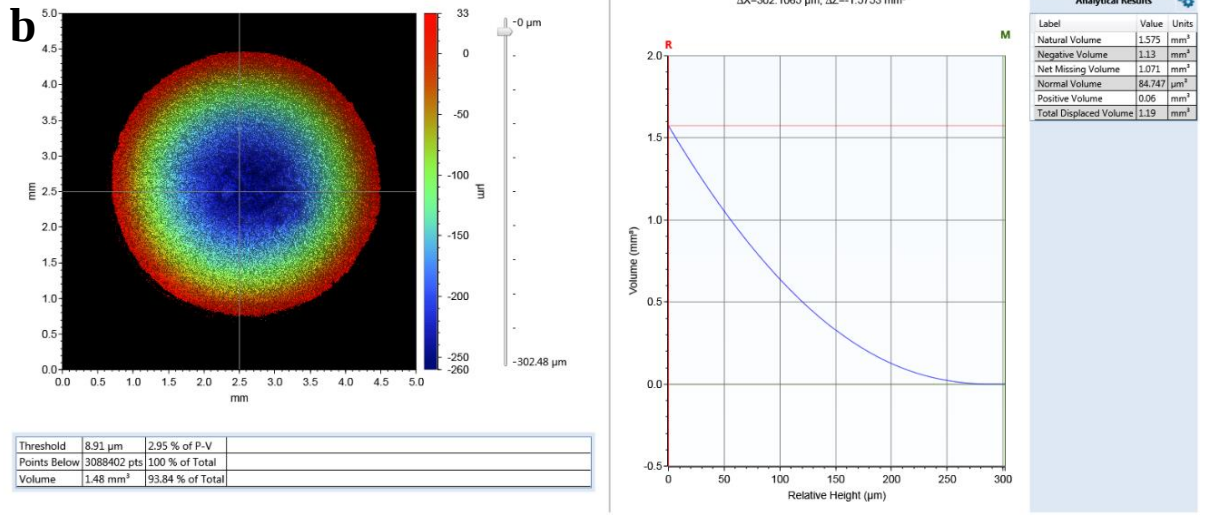
Şekil 23. 5 Hz. frekanstaki 10^4 çevrimdeki numunelerin hacim kayıpları

Şekillere bakıldığında 5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde darbe aşınmasına maruz kalan 5 farklı numunenin aşınma izlerinin 3d profilometre görüntülerine göre tespit edilen hacim kayıplarının karşılaştırılması Şekil 23'te verilmiştir. Buna göre Şekil 18 b'ye bakıldığında kaplamasız numunede $0,528 \text{ mm}^3$ 'lük hacim kaybı olmuştur. Şekil 19 b'ye bakıldığında ise MoTi kaplamalı numunenin $0,351 \text{ mm}^3$ 'lük hacim kaybı olmuştur. Diğer kaplamalara bakıldığında da kaplamasız numuneye göre darbe dayanımında iyileşme görülmektedir. 2,5 ve 5 Hz. frekans için karşılaştırma yapıldığında 5 Hz. frekansta darbe kuvveti arttığı için darbe izi daha derinlere nüfuz etmiştir.

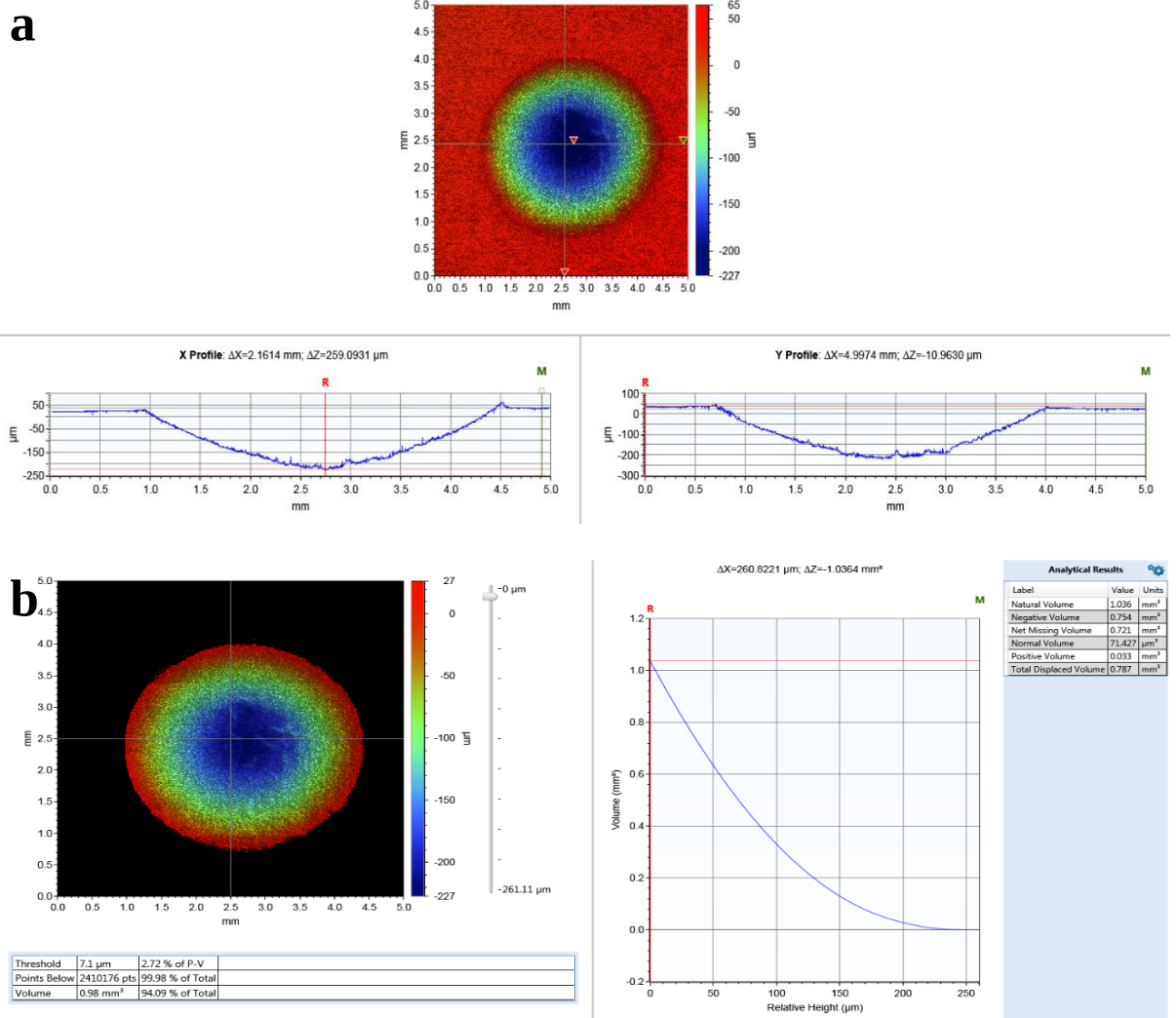
a



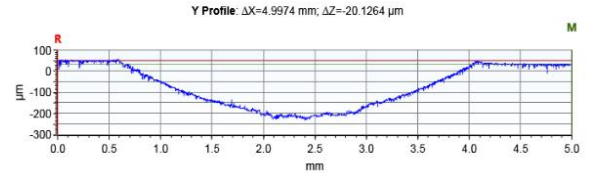
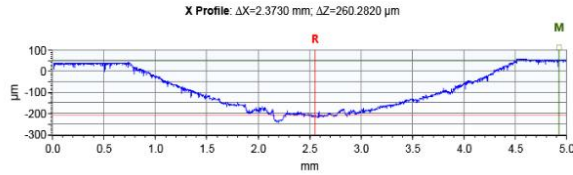
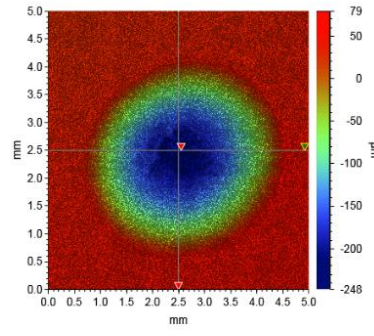
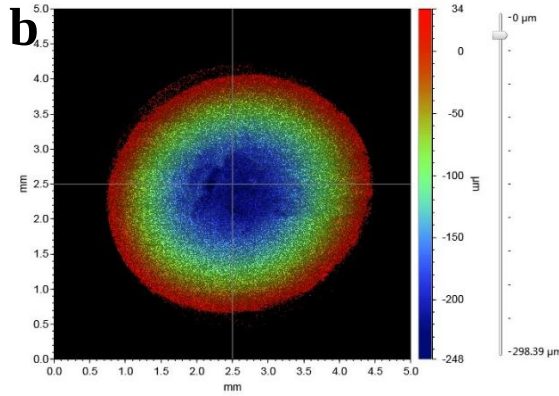
Şekil 24. Kaplamasız 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü



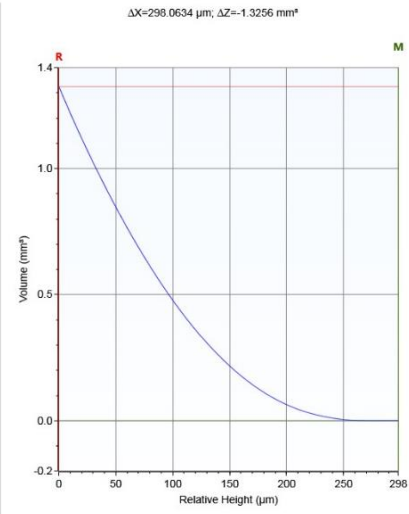
Şekil 24. Kaplamasız 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü (devamı)



Şekil 25. MoTi kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

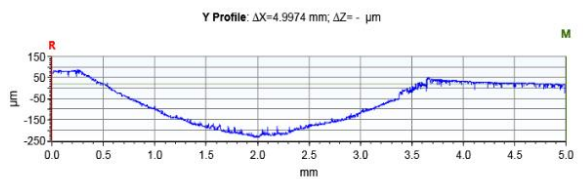
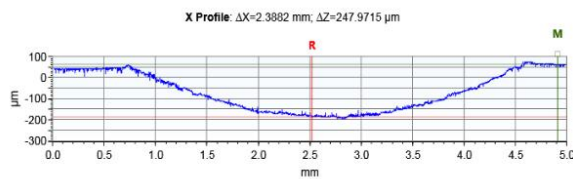
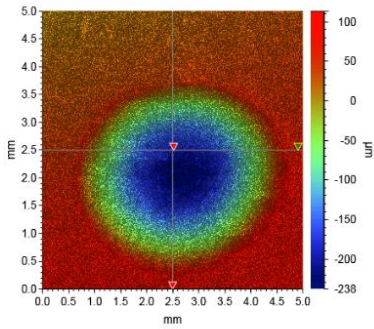
a**b**

Threshold	16.23 μm	5.44 % of P-V
Points Below	2862379 pts	99.59 % of Total
Volume	1.16 mm^3	87.47 % of Total

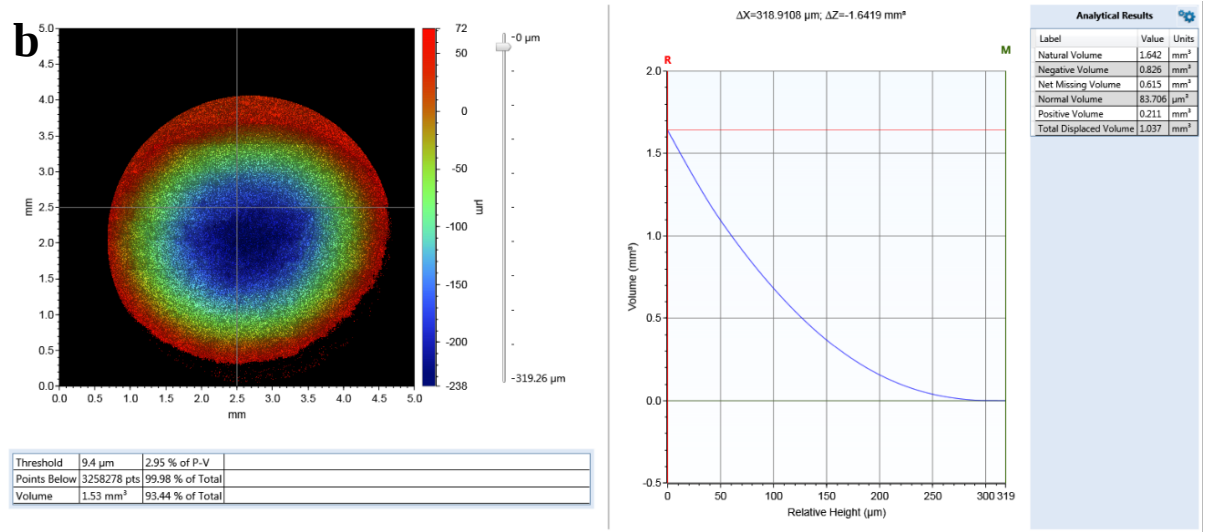


Analytical Results		
Label	Value	Units
Natural Volume	1.326	mm^3
Negative Volume	0.792	mm^3
Net Missing Volume	0.711	mm^3
Normal Volume	76.629	μm^3
Positive Volume	0.081	mm^3
Total Displaced Volume	0.873	mm^3

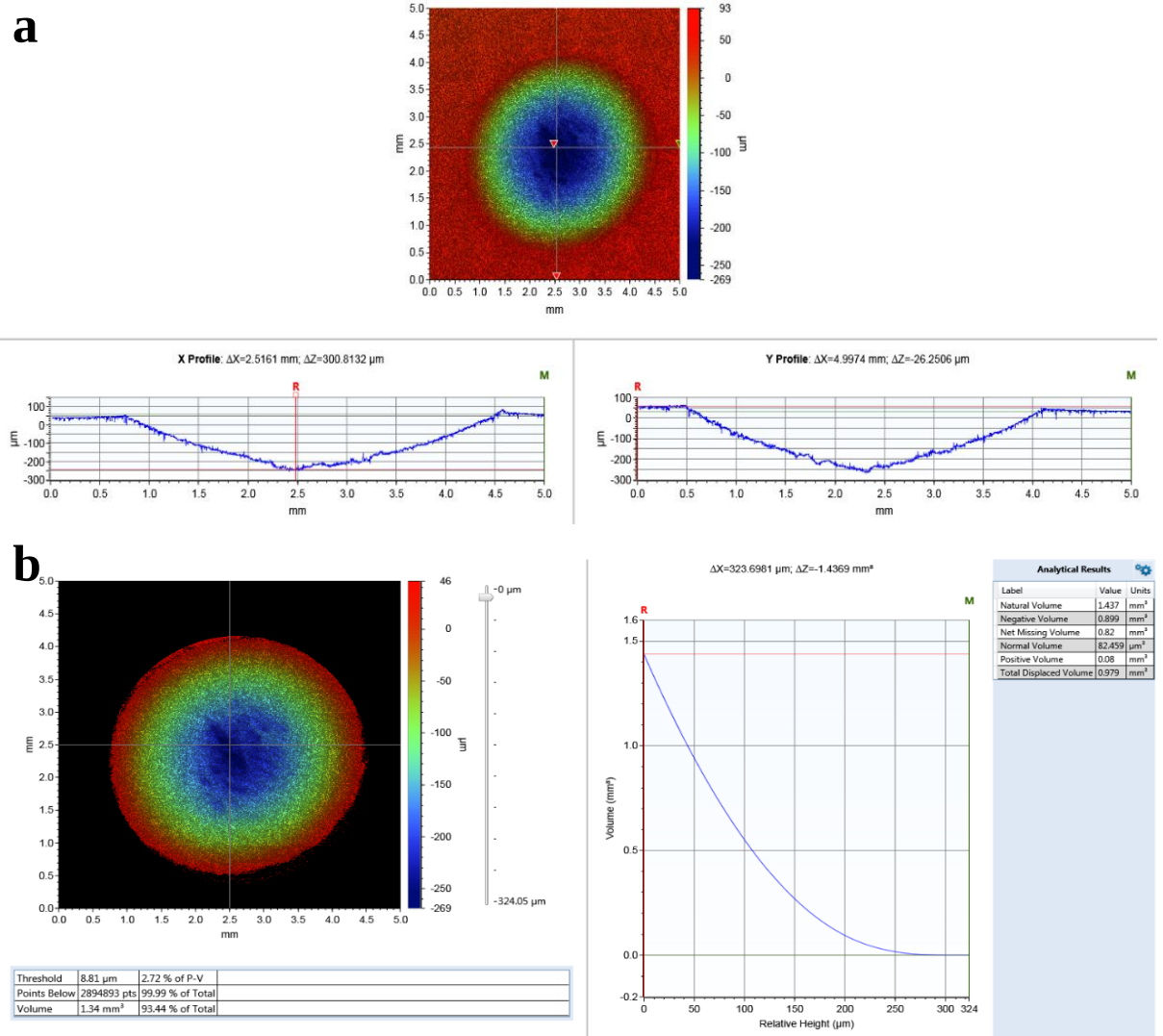
Şekil 26. CrMo kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

a

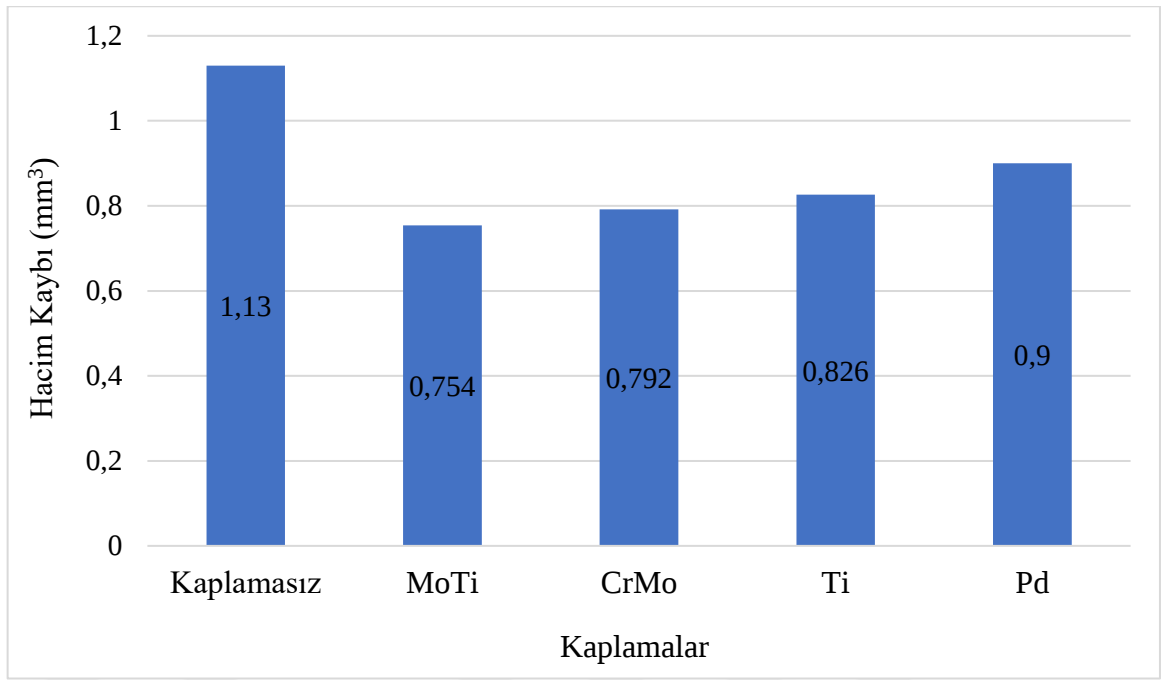
Şekil 27. Ti kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü



Şekil 27. Ti kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü (devamı)



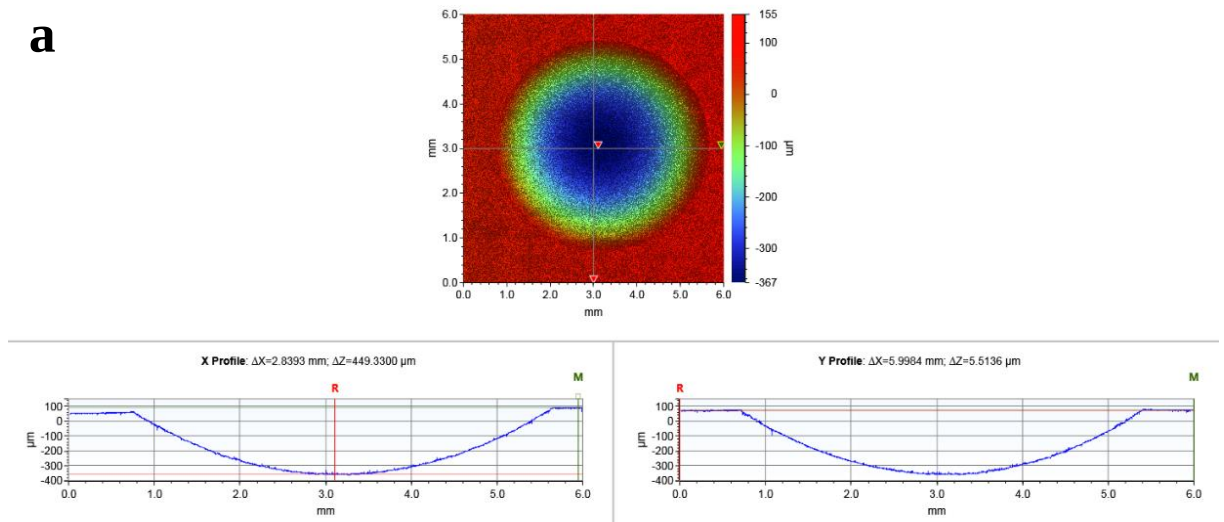
Şekil 28. Pd kaplamalı 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü



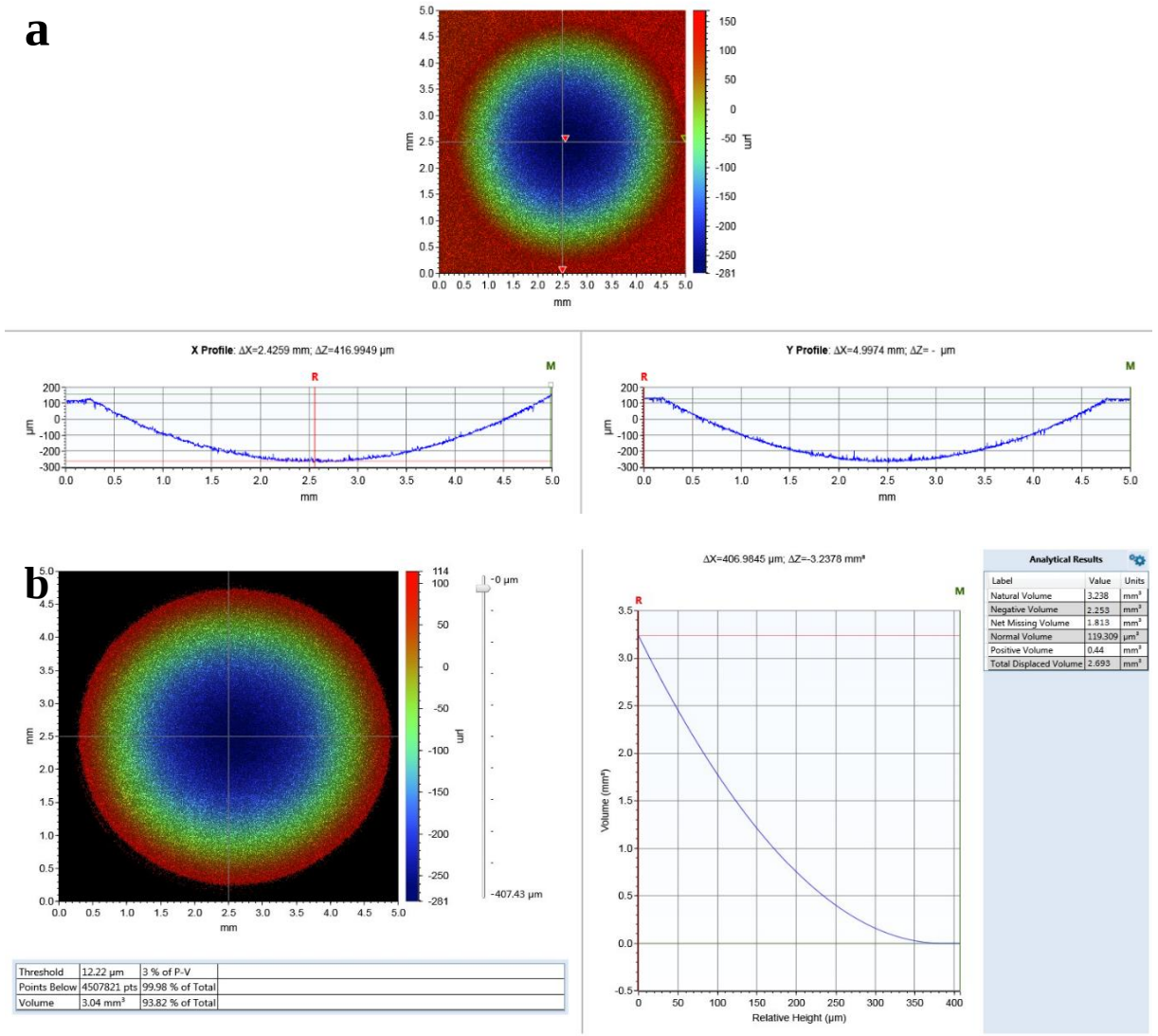
Şekil 29. 2,5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunelerin hacim kayıpları

Şekillere bakıldığında 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde darbe aşınmasına maruz kalan 5 farklı numunenin aşınma izlerinin 3d profilometre görüntülerine göre tespit edilen hacim kayıpları Şekil 29’da verilmiştir. Buna göre Şekil 24 b’ye bakıldığında kaplamasız numunede $1,13 \text{ mm}^3$ ’lük hacim kaybı olmuştur. Şekil 25 b’ye bakıldığında ise MoTi kaplamalı numunenin $0,754 \text{ mm}^3$ ’lük hacim kaybı olmuştur. Diğer kaplamalara bakıldığında da kaplamasız numuneye göre darbe dayanımında iyileşme görülmektedir. Yüksek çevrim sayısındaki tekrar eden darbeler sırasında, kaplama ve taban malzeme arasında gerilme, kayma veya yırtılmalar meydana gelebilir. Bu da kaplamanın soyulmasına, çatlamasına veya kırılmasına sebep olabilir. Kaplama ve taban malzeme arasındaki yapışma kuvveti, kaplama işleminin kalitesine, kaplama ve taban malzemelerinin uyumluluğuna ve kaplama kalınlığına bağlıdır (Teber 2015).

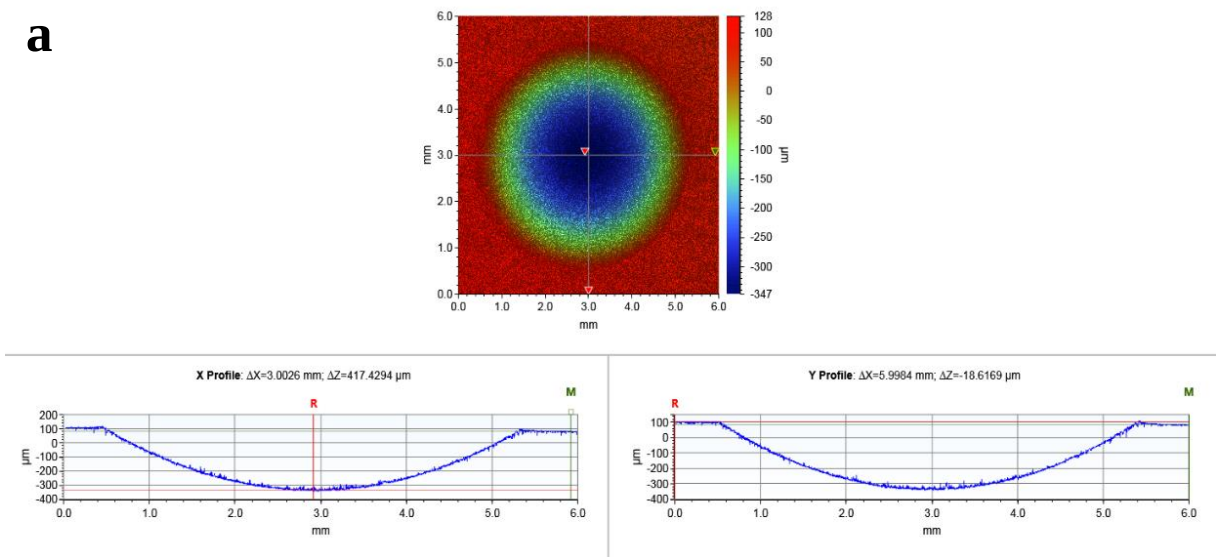
a



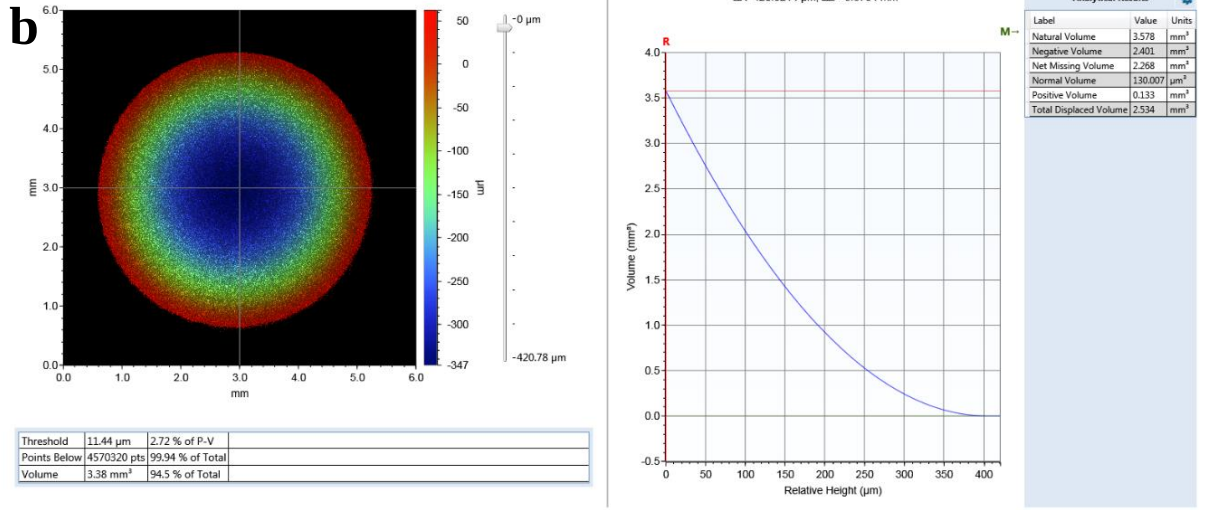
Şekil 30. Kaplamasız 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

a

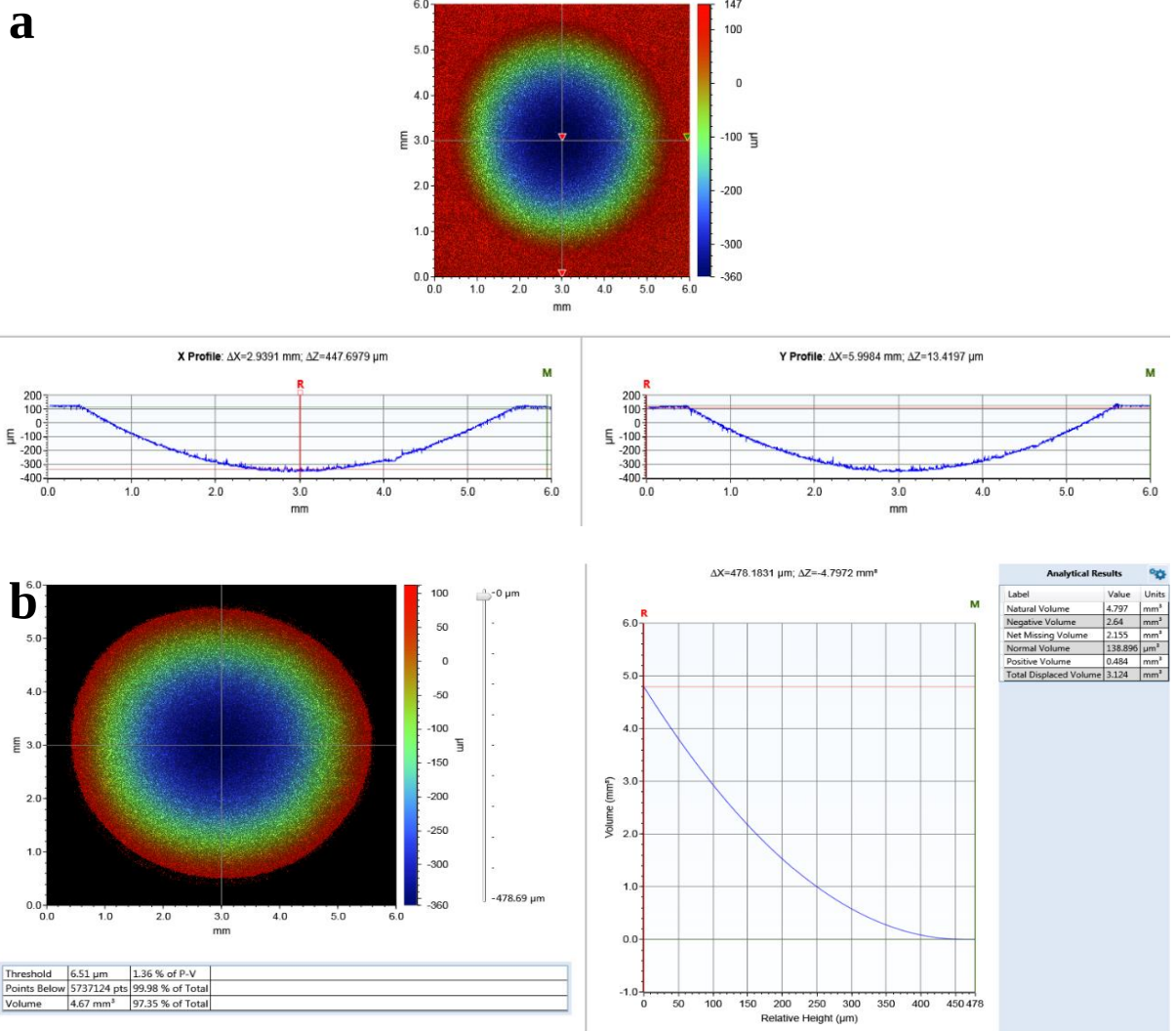
Şekil 32. CrMo kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü

a

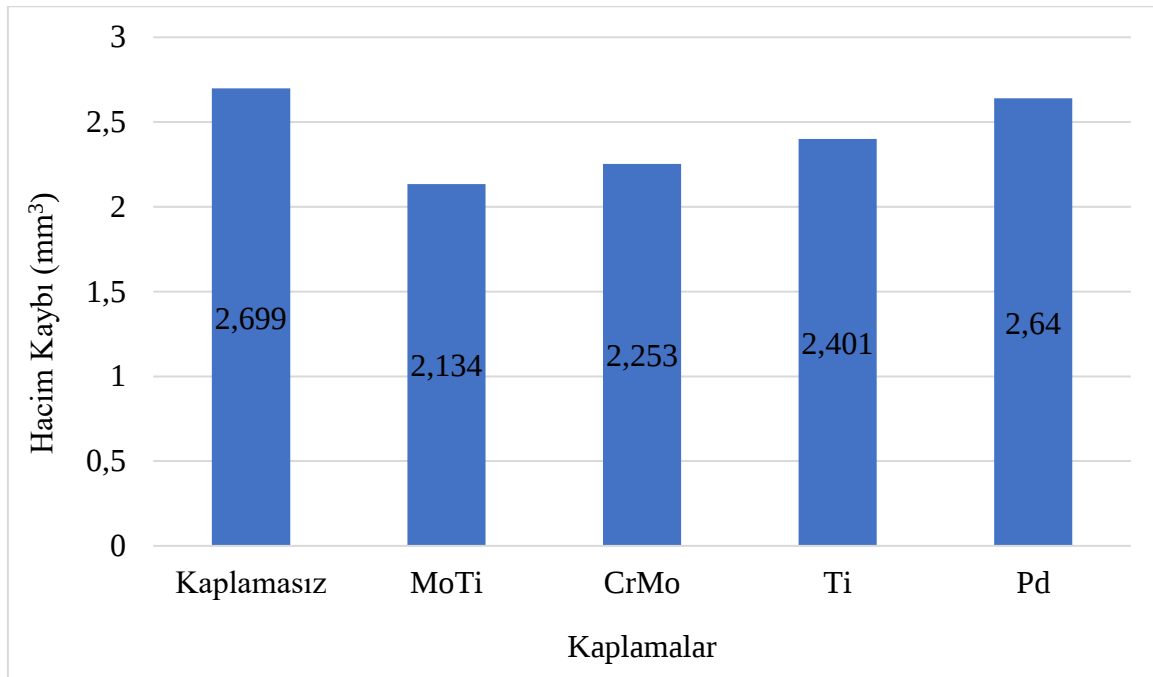
Şekil 33. Ti kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü



Şekil 33. Ti kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü (devamı)



Şekil 34. Pd kaplamalı 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunenin 3d profilometre görüntüsü



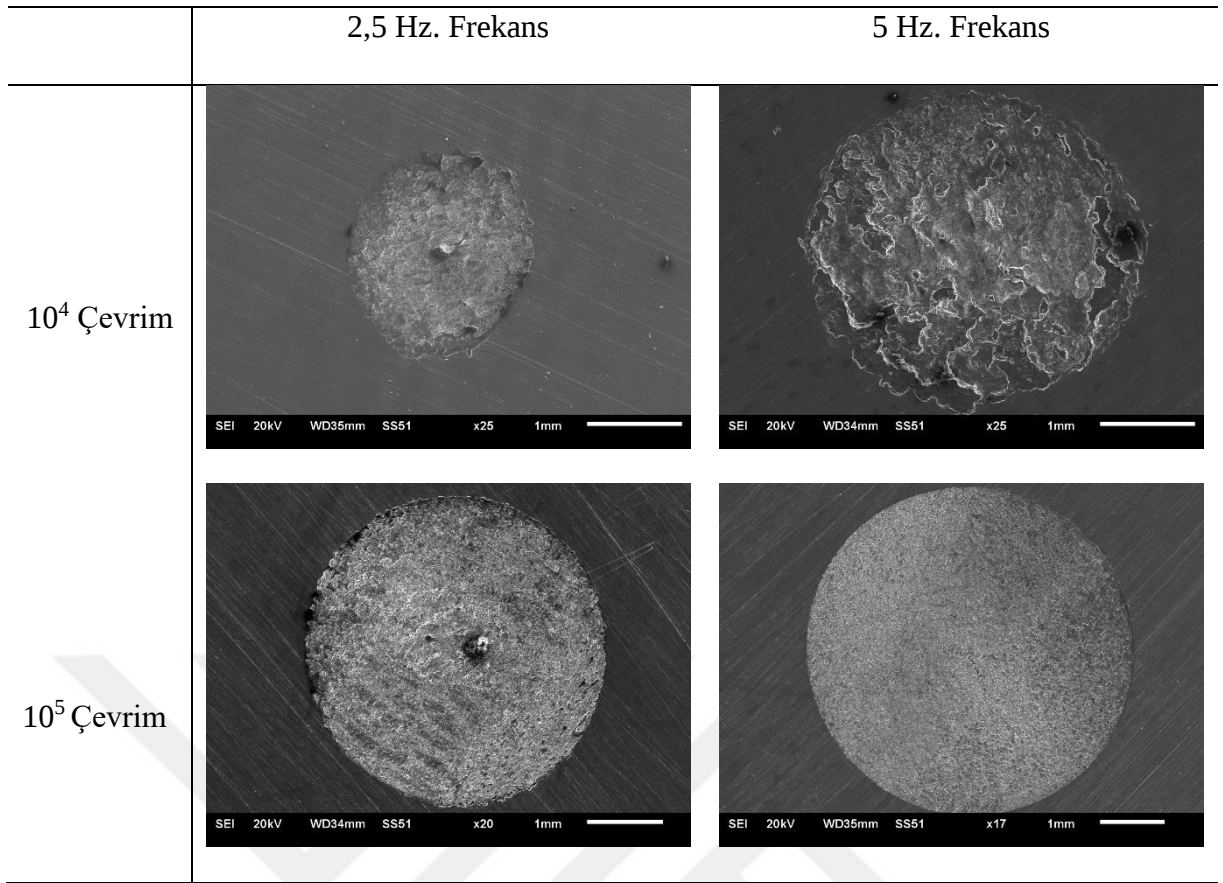
Şekil 35. 5 Hz. frekanstaki 10^5 çevrimdeki numunelerin hacim kayıpları

Şekillere bakıldığında 5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde darbe aşınmasına maruz kalan 5 farklı numunenin aşınma izlerinin 3d profilometre görüntülerine göre tespit edilen hacim kayıpları Şekil 35'te verilmiştir. Buna göre Şekil 30 b'ye bakıldığında kaplamasız numunede 2,699 mm³'lük hacim kaybı olmuştur. Şekil 31 b'ye bakıldığında ise MoTi kaplamalı numunenin 2,134 mm³'lük hacim kaybı olmuştur. Genel olarak 2,5 ve 5 Hz. frekans için karşılaştırma yapıldığında 5 Hz. frekansta darbe kuvveti arttığı için darbe izi daha derinlere nüfuz etmiş ve yüzeyde daha geniş krater oluşmuştur.

Darbeli Aşınma Deneyleri Aşınma İzi Morfolojisi

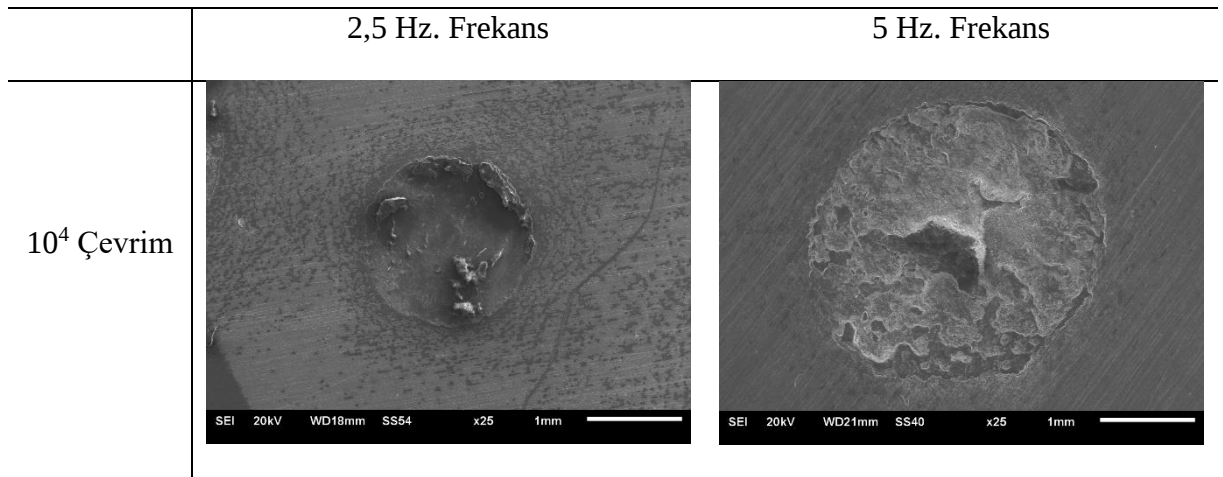
3D profilometre analizlerinden ulaşılan verilere göre darbe dayanımını arttırdığı görülen kaplama malzemeleri SEM görüntüleri ve EDS analizleri için seçilmiştir.

Şekil 36'da kaplamasız numunelere hava ortamında uygulanan 2,5 Hz. ve 5 Hz. frekanslarda 10^4 ve 10^5 çevrim sayılarında maruz kaldıkları darbeli aşınma sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.

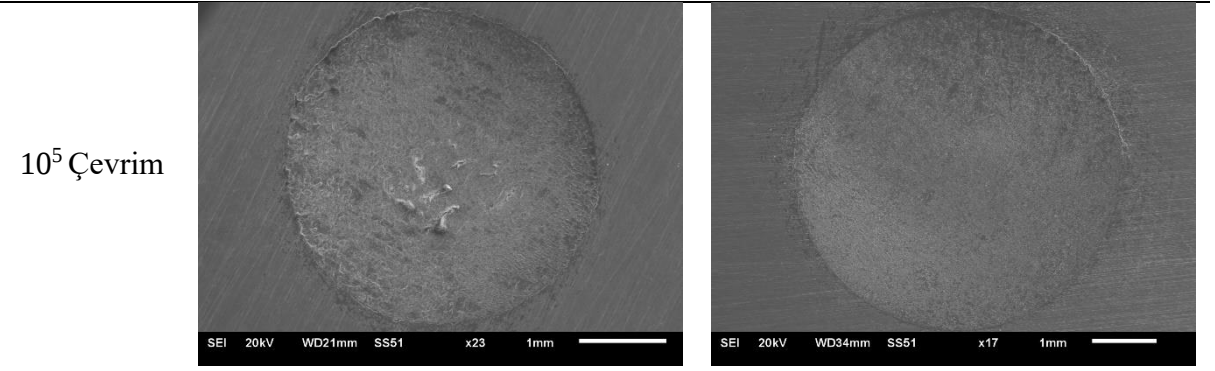


Şekil 36. Kaplamasız numunelerin darbeli aşınma sonrası SEM görüntüleri

Şekil 37’de MoTi kaplamalı numunelere hava ortamında uygulanan 2,5 Hz. ve 5 Hz. frekanslarda 10^4 ve 10^5 çevrim sayılarında maruz kaldıkları darbeli aşınma sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 37. MoTi kaplamalı numunelerin darbeli aşınma sonrası SEM görüntüleri



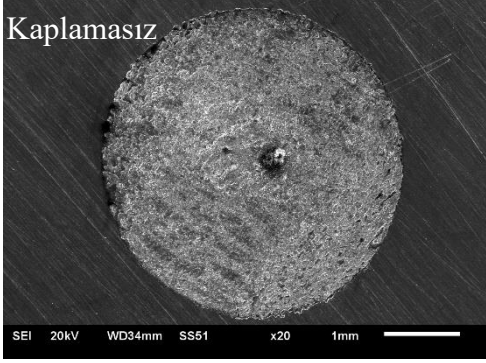
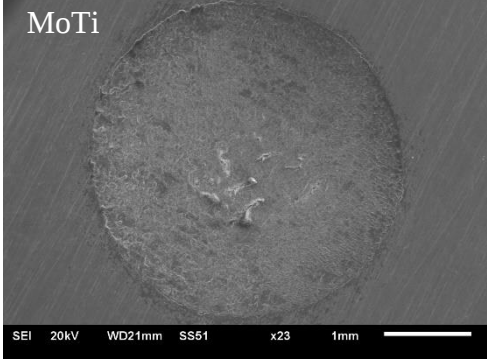
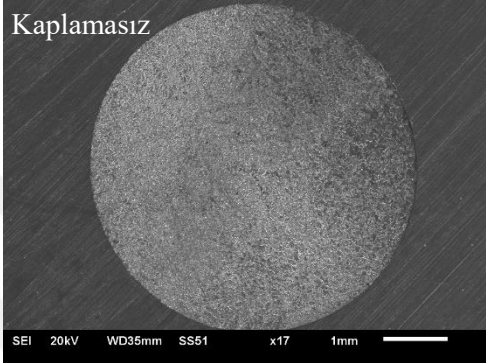
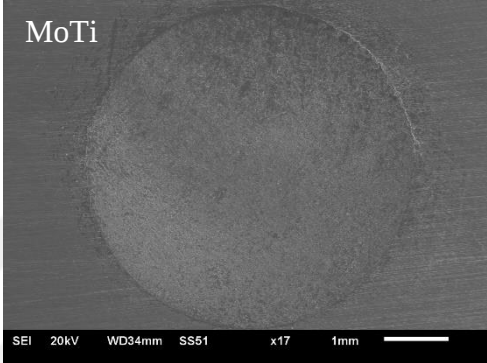
Şekil 37. MoTi kaplamalı numunelerin darbeli aşınma sonrası SEM görüntüleri (devamı)

Şekil 38’de 2,5 ve 5 Hz. frekansta 10⁴ çevrimde kaplamasız ve MoTi kaplamalı numunelerin maruz kaldıkları darbeli aşınma sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.

	Kaplamasız	Kaplamalı
2,5 Hz.	Kaplamasız	MoTi
5 Hz.	Kaplamasız	MoTi

Şekil 38. 2,5 ve 5 Hz. frekansta 10⁴ çevrimde numunelerin SEM görüntüleri

Şekil 39’da 2,5 ve 5 Hz. frekansta 10⁵ çevrimde kaplamasız ve MoTi kaplamalı numunelerin maruz kaldıkları darbeli aşınma sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.

	Kaplamasız	Kaplamalı
2,5 Hz.		
5 Hz.		

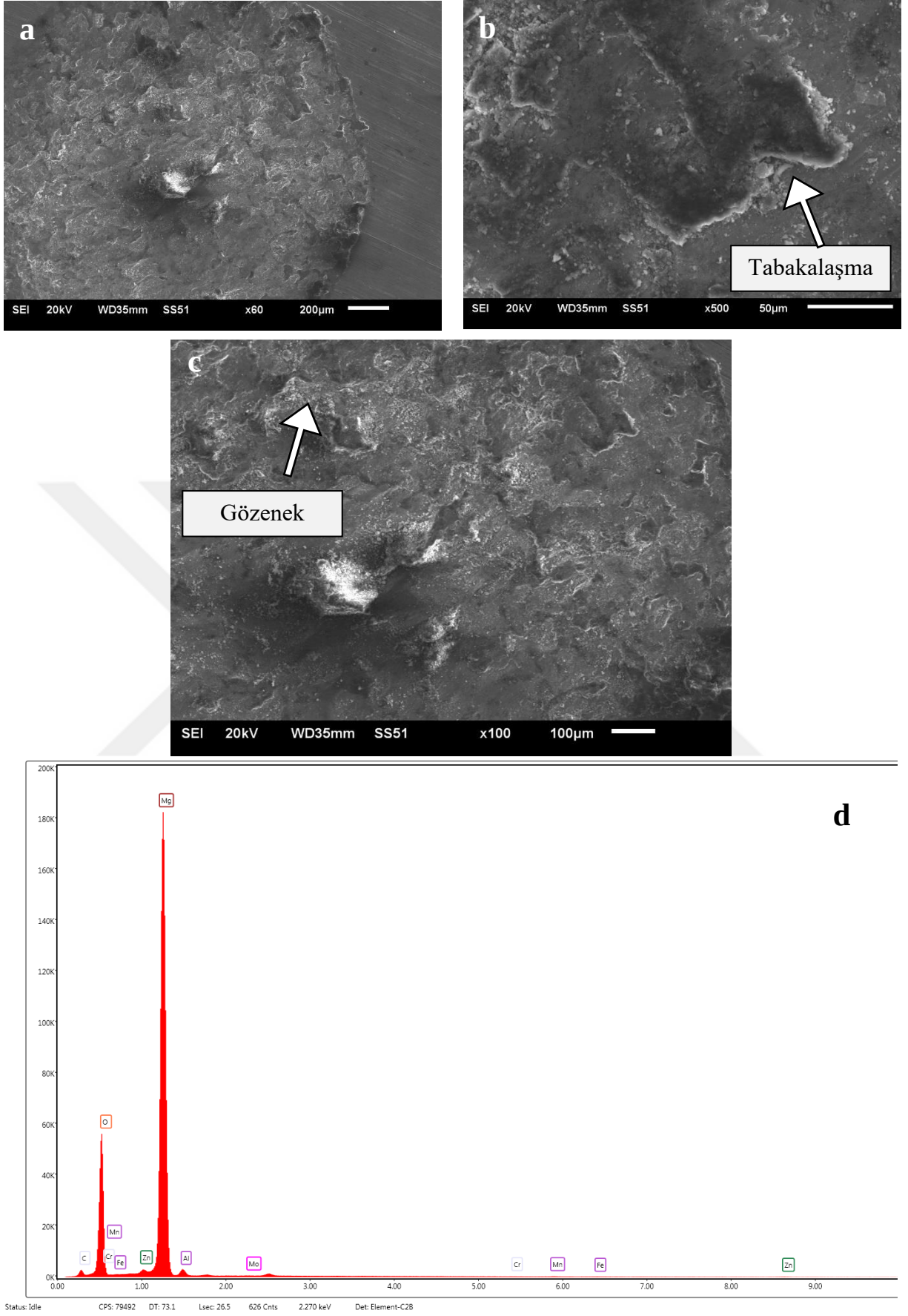
Şekil 39. 2,5 ve 5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde numunelerin SEM görüntüleri

Uygulanan farklı parametrelerdeki darbe testleri sonucunda yüzeyde darbeli aşınmalara bağlı bozulmalar meydana gelmiştir. Oluşan bu aşınmalar, kaplamanın kalınlığına, cinsine, yapışma gücüne, yüzey pürüzlülüğüne, darbe elemanına, sürtünme koşullarına, çevrenin kimyasal etkilerine ve diğer faktörlere bağlıdır. Yüzeylerde oluşan dairesel çukur izleri çarpma topunun geometrik şekli ile oluşmuştur. Oluşan bu izler sürtünme aşınması olarak tanımlanan yüzeyin bozulmasına yol açmıştır.

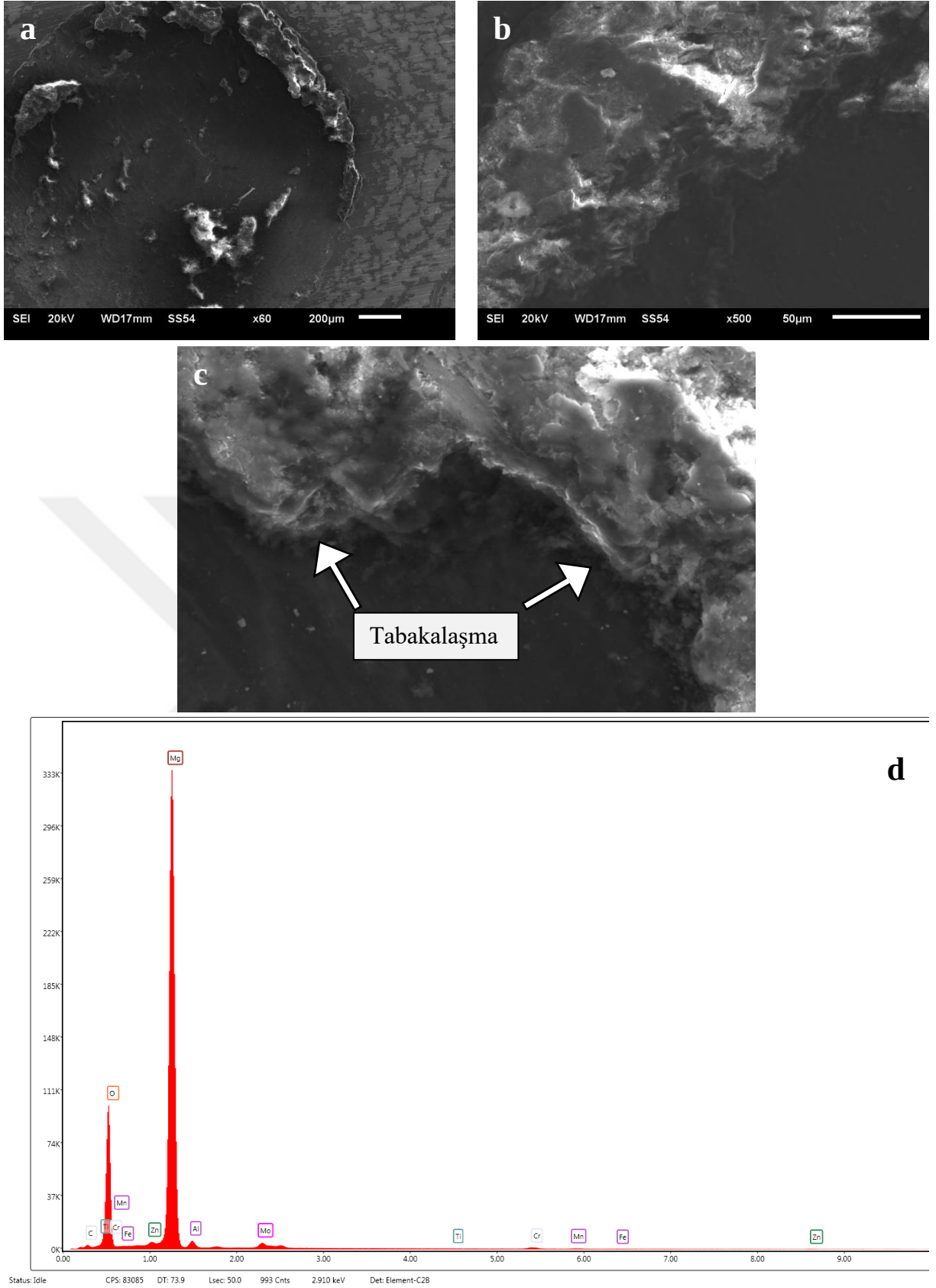
5 Hz. frekansta gerçekleştirilen tüm testlerde darbe kuvveti ve darbe enerjisi 2,5 Hz.’ye göre daha yüksek frekansta darbeler olduğu için kaplamasız ve kaplamalı numunelerde daha büyük aşınmalar oluşmuştur. Bunun yanında 10^4 ve 10^5 çevrim sayılarında, vuruş sayısı daha fazla olduğu için 10^5 çevrimde oluşan tüm izlerin, 10^4 çevrime göre daha derinde olduğu gözle görülebilmektedir.

SEM-EDS Analizleri

3D profilometre analizlerine göre istenen değerleri iyileştirdiği görülen kaplamalar belirlenmiştir. Bu numunelerin aşınma yüzey morfolojileri BÜMLAB’da bulunan “JEOL- JSM 6510” marka SEM görüntüleme cihazında elde edilmiştir.



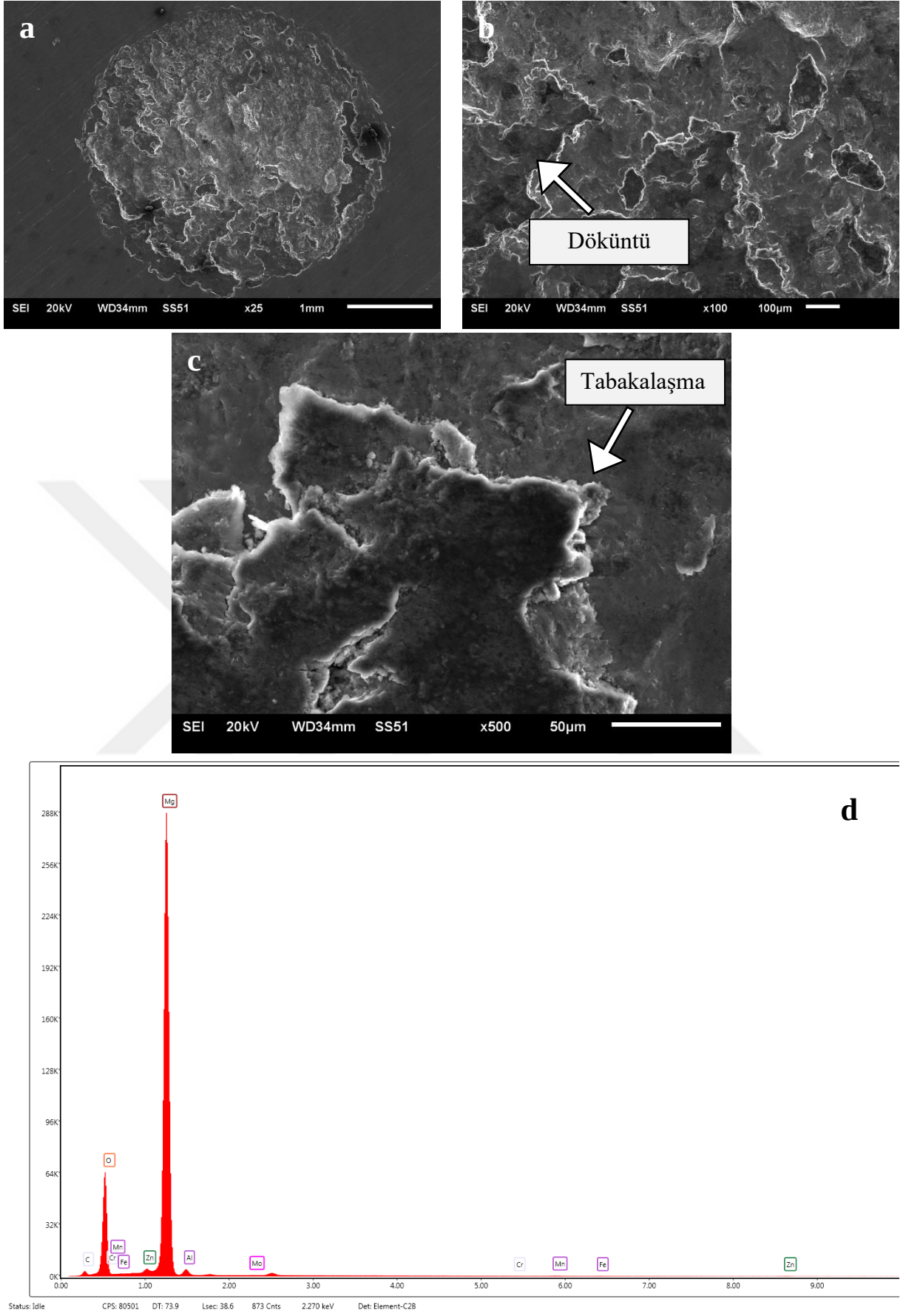
Şekil 40. Kaplamasız 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü



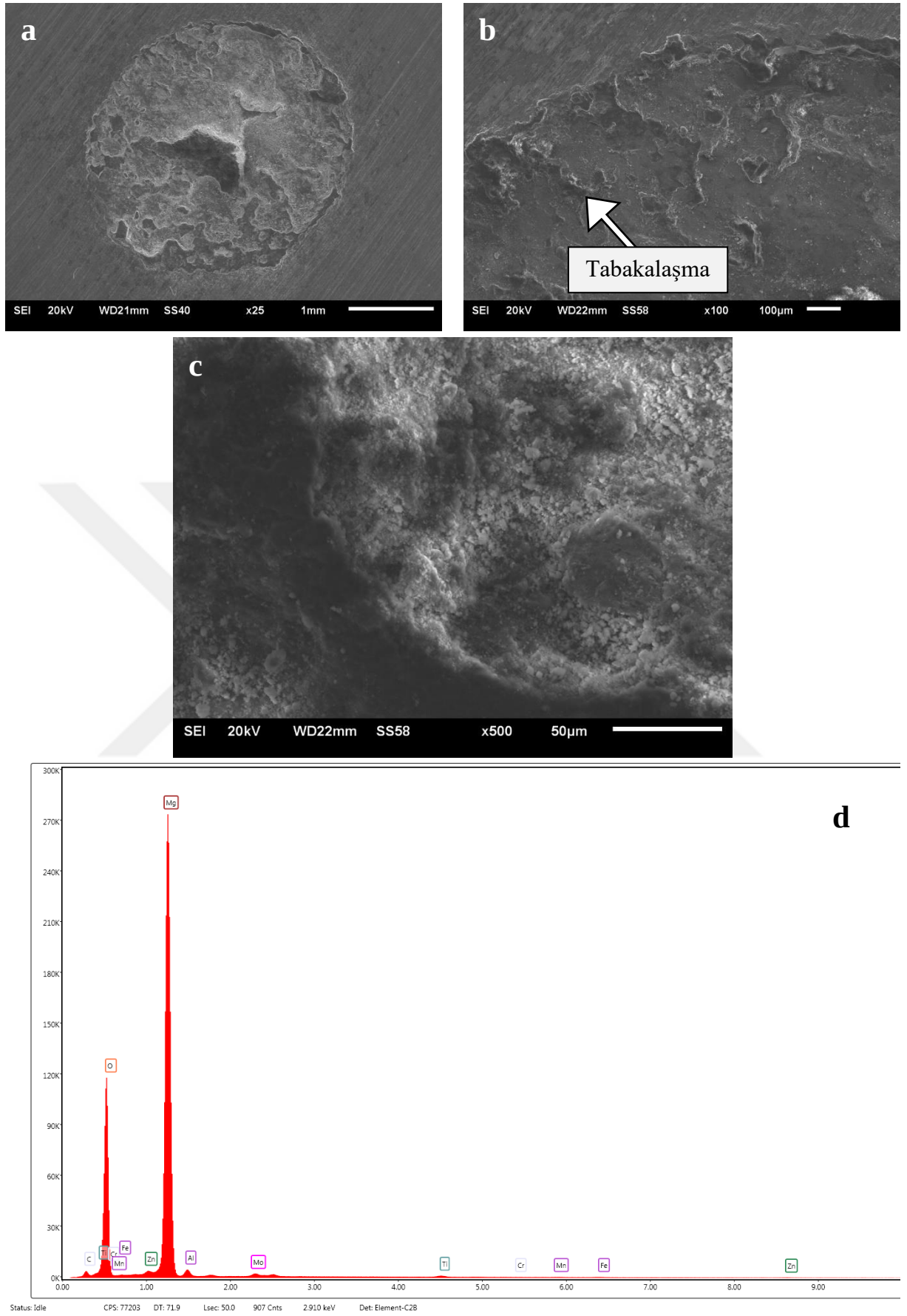
Şekil 41. MoTi 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü

Şekil 40'a göre darbe elemanın, 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde kaplamasız numuneye bıraktığı dairesel iz görülmektedir. Şekil 40 b'de bu ize yakından bakıldığında numunede darbeler esnasındaki sürtünmeler tabakalaşma şeklinde numune yüzeyinde aşınmalara sebep olmuştur. Şekil 40 c'de ise taban malzeme yüzeyinde gözeneklerin de olduğu görülmektedir. Malzemenin aşınma gerçekleşen yüzeyinden alınan EDS analizi Şekil 40 d'de gösterilmektedir. Kaplamasız taban malzemeye gerçekleştirilen bu darbe testinde içerisindeki Al, Zn elementleri AZ31 alaşımı ile ve Fe, Cr, C elementleri ise çarpma elemanı olan çelik bilyenin malzemeye transfer edilmesiyle açıklanabilir.

Şekil 41'e göre ise darbe elemanın, 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde MoTi kaplamalı numuneye bıraktığı dairesel iz görülmektedir. Şekil 41 c'de bu ize yakından bakıldığında numunenin taban malzemesinde temas sırasındaki aşınmalardan dolayı oluşan gerilme farklılıkları tabakalaşma şeklinde numune yüzeyinde aşınmalara neden olmuştur. Malzemenin aşınma gerçekleşen yüzeyinden alınan EDS analizi Şekil 41 d'de gösterilmektedir. Manyetik alanda sıçratma yöntemiyle gerçekleştirilen MoTi kaplamada, kaplama içerisindeki Mo ve Ti ile, Al, Zn elementleri AZ31 alaşımı ile ve Fe, Cr, C elementleri ise çarpma elemanı olan çelik bilyenin malzemeye transfer edilmesiyle açıklanabilir.



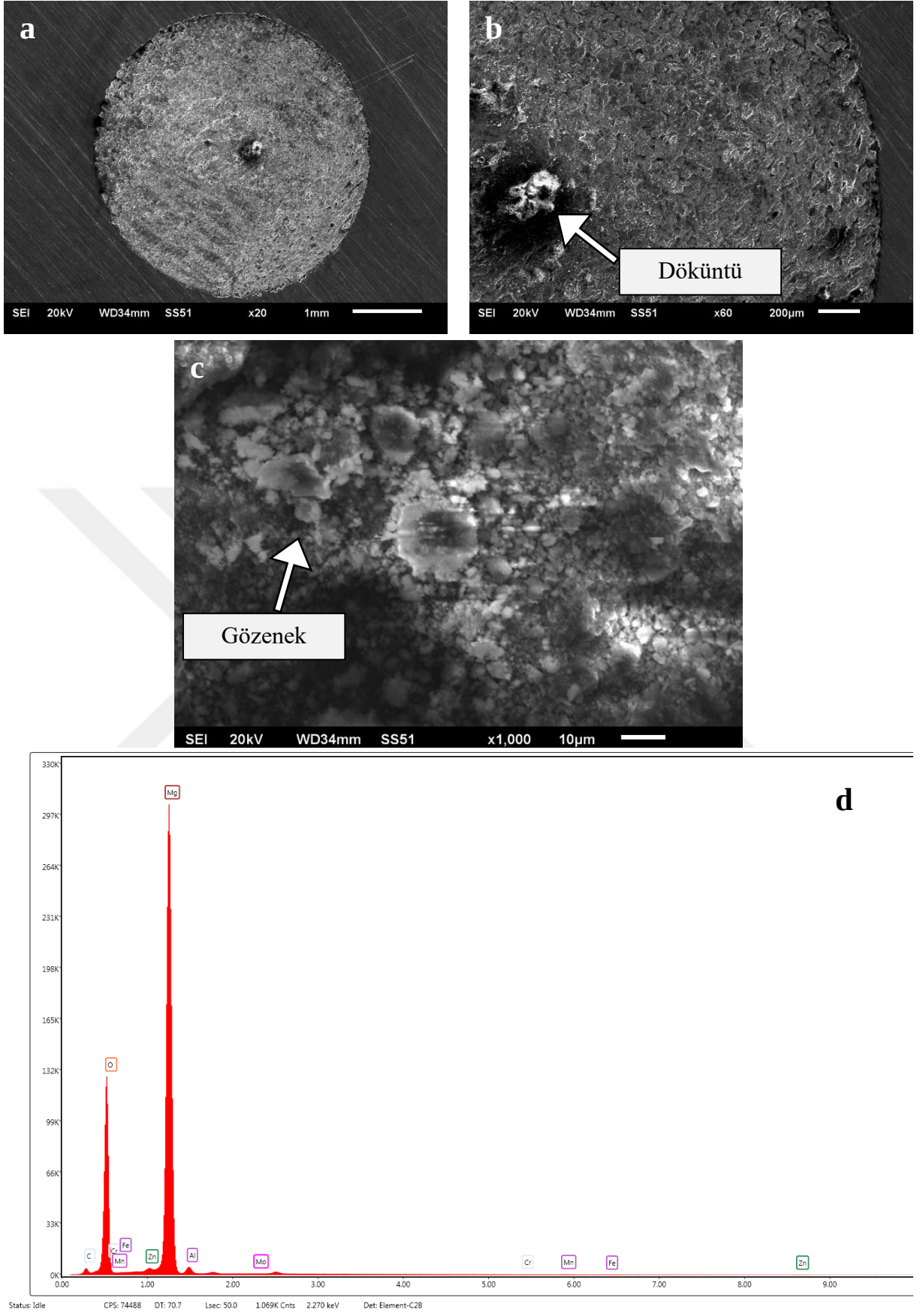
Şekil 42. Kaplamasız 5 Hz. frekansta 10^4 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü



Şekil 43. MoTi 5 Hz. frekansta 10^4 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü

Şekil 42'ye göre darbe elemanının, 5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde kaplamasız numuneye yaptığı darbelerde bıraktığı dairesel iz görülmektedir. Şekil 42 b'de bu ize yakından bakıldığında numunede darbeler esnasındaki oluşan döküntüler görülmektedir. Şekil 42 c'de ise daha fazla yakınlaştırıldığında yüzeydeki tabakalaşmalar görülmektedir. Kaplamasız malzemenin aşınma gerçekleşen yüzeyinden alınan EDS analizi Şekil 42 d'de gösterilmektedir. Kaplamasız taban malzemeye gerçekleştirilen bu darbe testinde AZ31 alaşımı içeriğinde bulunan Al, Zn ve çarpma elemanı olan çelik bilyenin malzemeye transfer edilmesiyle Fe, Cr, C varlığı açıklanabilir.

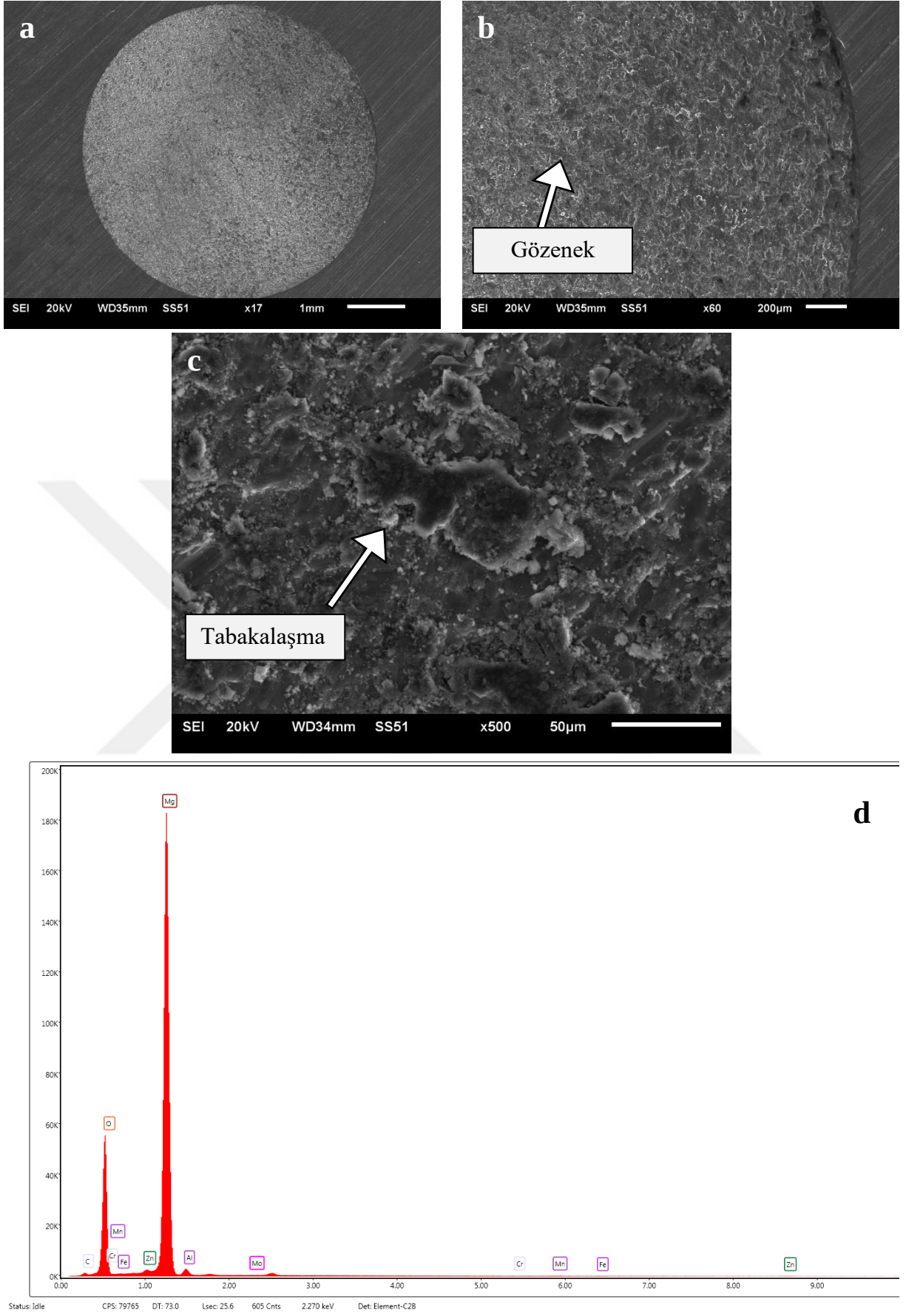
Şekil 43'e bakıldığında darbe elemanının, 5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde MoTi kaplamalı numuneye bıraktığı dairesel iz görülmektedir. Şekil 43 a'da bu ize bakıldığında tabakalaşmalar görülmektedir. Şekil 43 b'ye bakıldığında darbe alanının sınır hattında da tabakalaşmalar şeklinde aşınmaların mevcut olduğu görülmüştür. Malzemenin aşınma gerçekleşen yüzeyinden alınan EDS analizi Şekil 43 d'de gösterilmektedir. Manyetik alanda sıçratma yöntemiyle gerçekleştirilen MoTi kaplamada, kaplama içerisindeki Mo ve Ti elementleri ile, Al, Zn elementleri ise AZ31 alaşımıyla ve Fe, Cr, C elementlerinin varlığı ise çarpma elemanı olan çelik bilyenin malzemeye transfer edilmesiyle açıklanabilir.



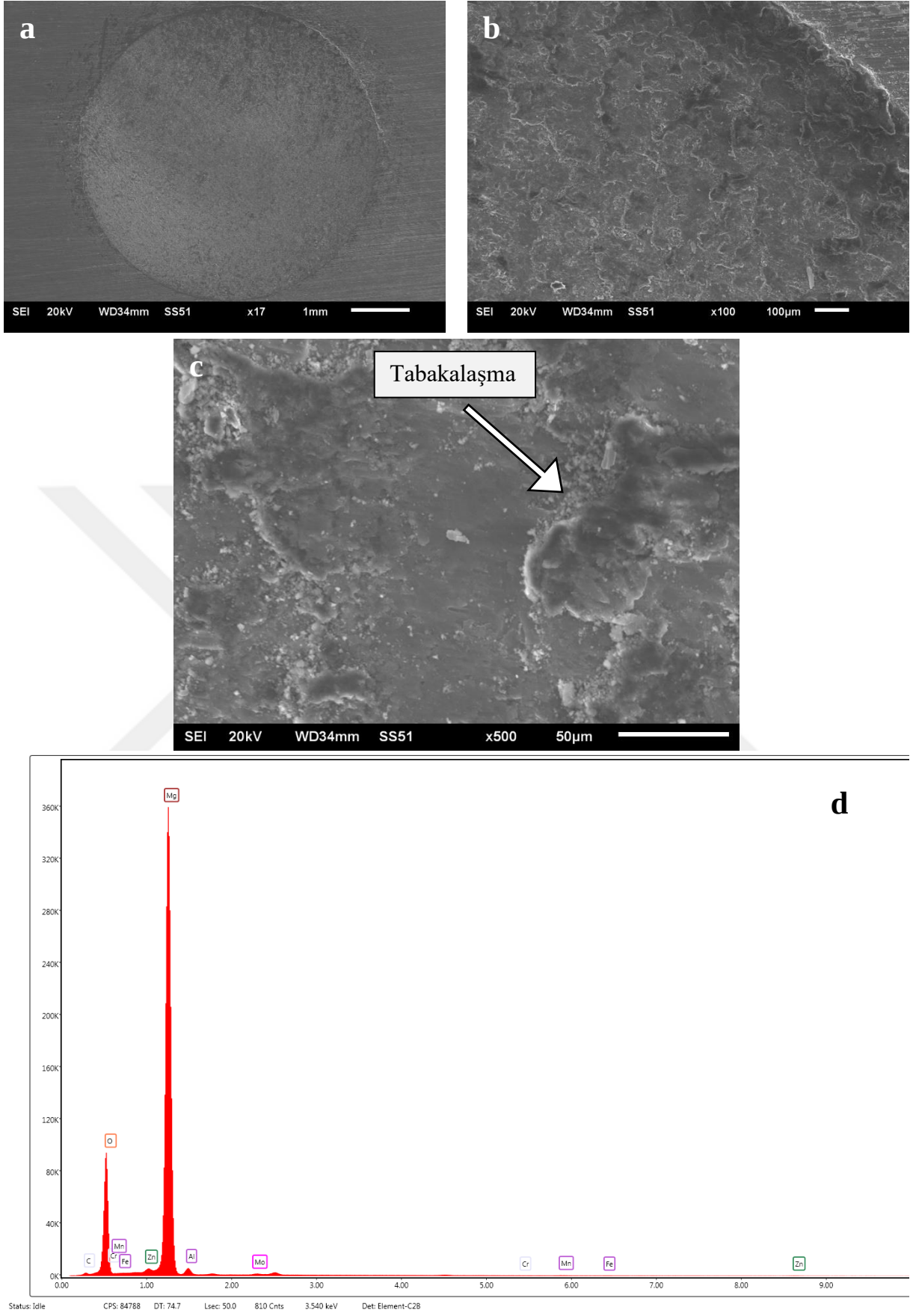
Şekil 44. Kaplamasız 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü

Şekil 44'e göre darbe elemanının, 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde kaplamasız numuneye yaptığı darbelerde bıraktığı dairesel iz görülmektedir. Şekil 44 b'de bu ize yakından bakıldığında numunede darbeler esnasındaki oluşan döküntü görülmektedir. Şekil 44 c'de ise görüntü daha fazla yakınlaştırıldığında yüzeydeki gözenekler görülmektedir. Kaplamasız malzemenin aşınma gerçekleşen yüzeyinden alınan EDS analizi Şekil 44 d'de gösterilmektedir. Kaplamasız taban malzemeye gerçekleştirilen bu darbe testinde AZ31 alaşımı içeriğinde bulunan Al, Zn ve çarpma elemanı olan çelik bilyenin malzemeye transfer edilmesiyle Fe, Cr, C elementlerinin varlığı açıklanabilir.

Şekil 45'e bakıldığında darbe elemanının, 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde MoTi kaplamalı numuneye bıraktığı dairesel iz görülmektedir. Şekil 45 b'de bu ize yakından bakıldığında tabakalaşmalar görülmektedir. Şekil 45 b'ye bakıldığında tabakalaşmanın yoğunluğu görülmüştür. Malzemenin aşınma gerçekleşen yüzeyinden alınan EDS analizi Şekil 45 d'de gösterilmektedir. Manyetik alanda sıçratma yöntemiyle gerçekleştirilen MoTi kaplamada, kaplama içerisindeki Mo ve Ti ile, Al, Zn elementleri ise AZ31 alaşımı ile ve Fe, Cr, C elementlerinin varlığı ise çarpma elemanı olan çelik bilyenin malzemeye transfer edilmesiyle açıklanabilir.



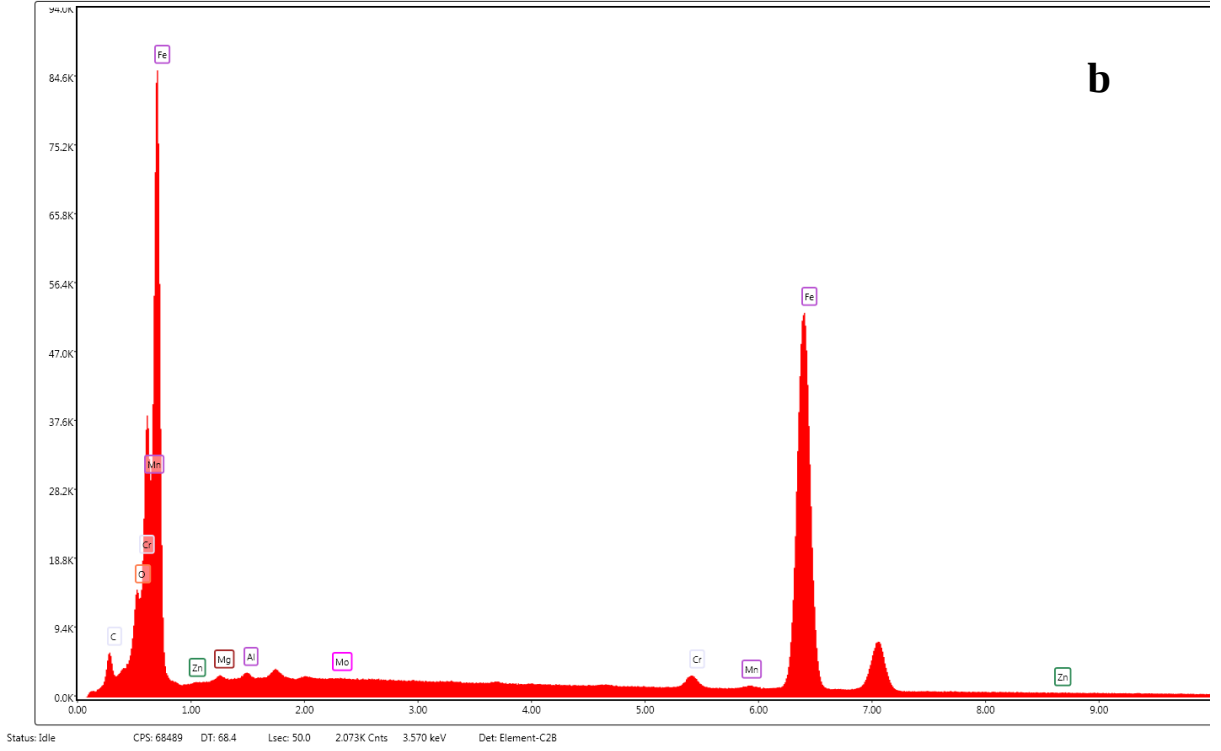
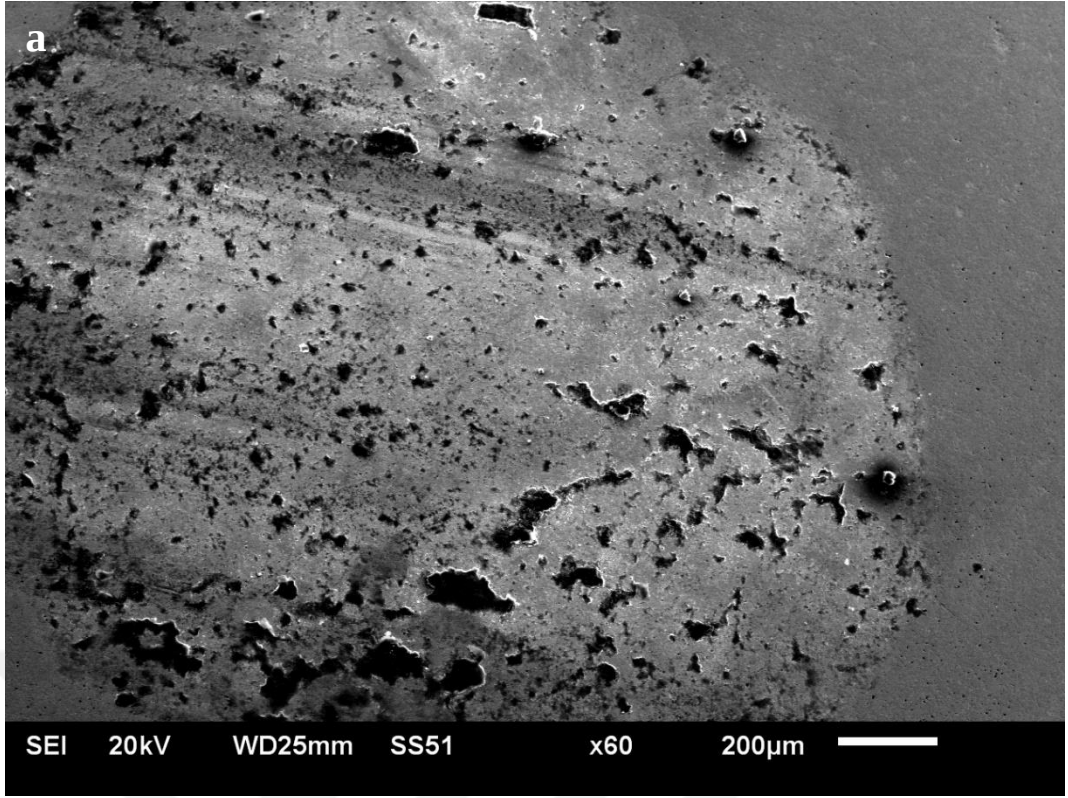
Şekil 46. Kaplamasız 5 Hz. frekansta 10^5 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü



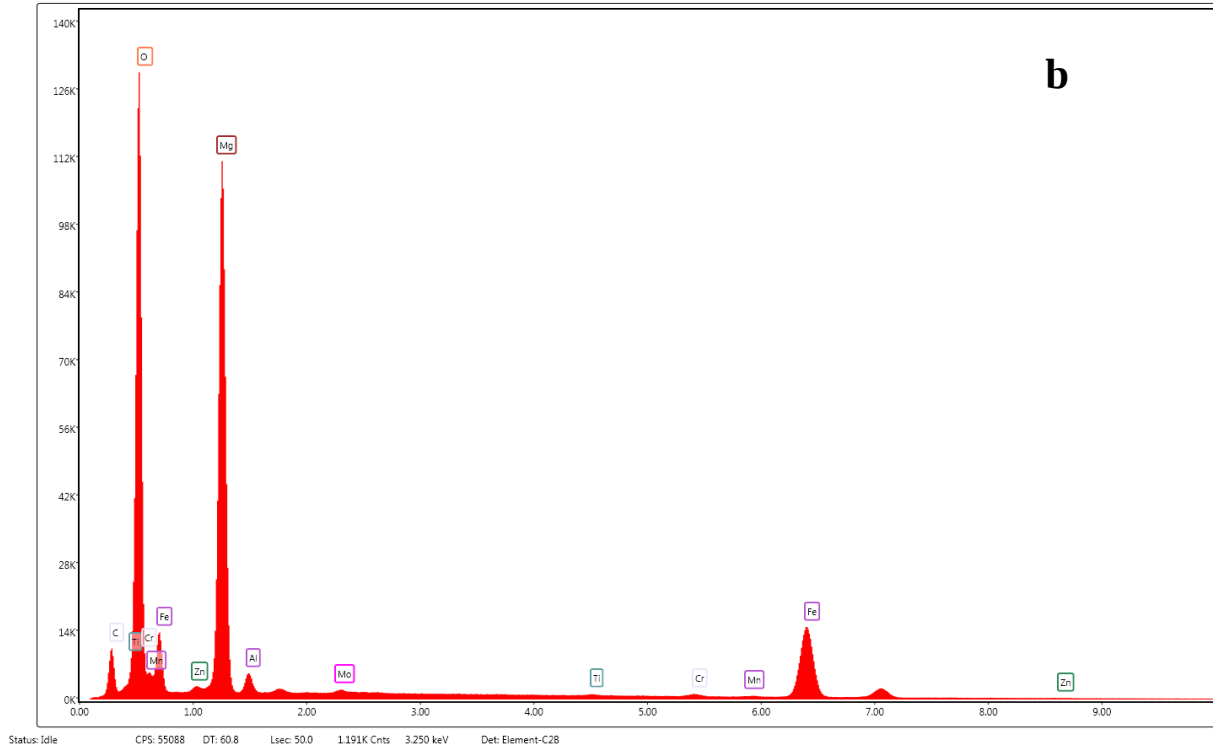
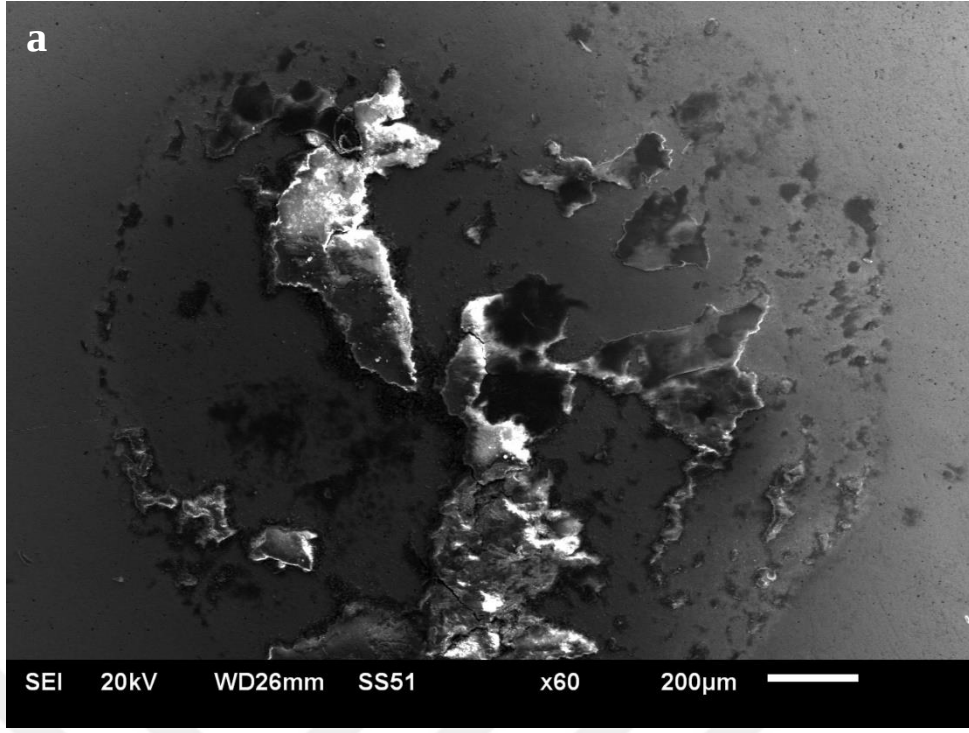
Şekil 47. MoTi 5 Hz. frekansta 10^5 çevrim numune SEM ve EDS görüntüsü

Şekil 46'ya göre darbe elemanının, 5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde kaplamasız numuneye yaptığı darbelerde bıraktığı dairesel iz görülmektedir. Şekil 46 b'de bu ize bakıldığında numunede darbeler esnasındaki oluşan gözenekler görülmektedir. Şekil 46 c'de daha fazla yakınlaştırıldığında yüzeydeki tabakalaşma görülmektedir. Kaplamasız malzemenin aşınma gerçekleşen yüzeyinden alınan EDS analizi Şekil 46 d'de gösterilmektedir. Kaplamasız taban malzemeye gerçekleştirilen bu darbe testinde AZ31 alaşımı içeriğinde bulunan Al, Zn ve çarpma elemanı olan çelik bilyenin malzemeye transfer edilmesiyle Fe, Cr, C varlığı açıklanabilir.

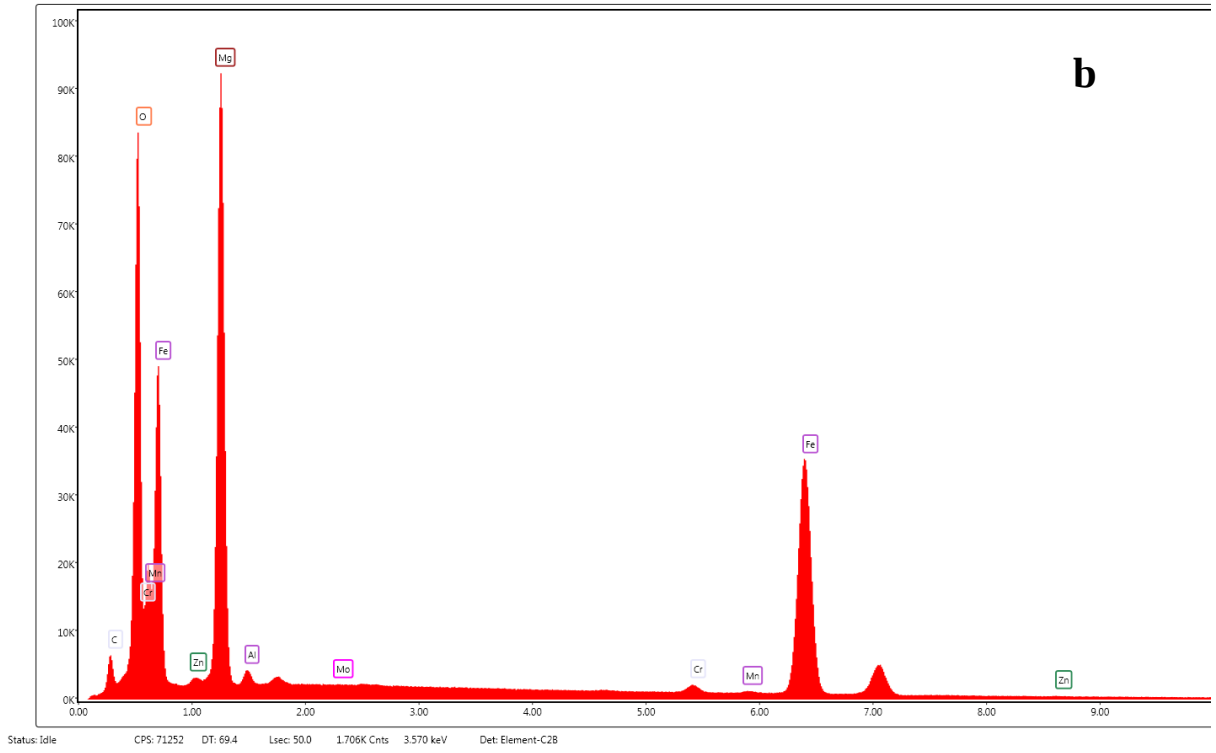
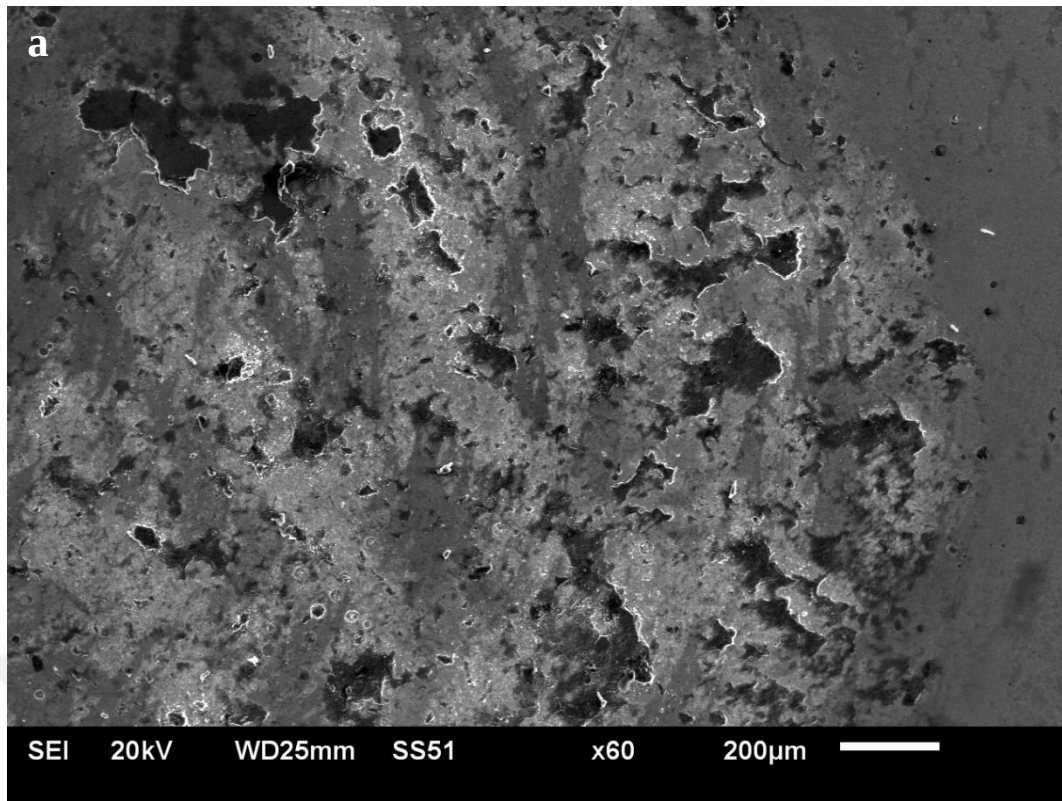
Şekil 47'ye bakıldığında darbe elemanının, 5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde MoTi kaplamalı numuneye bıraktığı dairesel iz görülmektedir. Şekil 47 b'de bu ize yakından bakıldığında oluşan tabakalaşmalar görülmektedir. Malzemenin aşınma gerçekleşen yüzeyinden alınan EDS analizi Şekil 47 d'de gösterilmektedir. Manyetik alanda sıçratma yöntemiyle gerçekleştirilen MoTi kaplamada, kaplama içerisindeki Mo ve Ti ile, Al, Zn elementleri ise AZ31 alaşımı ile ve Fe, Cr, C elementlerinin varlığı ise çarpma elemanı olan çelik bilyenin malzemeye transfer edilmesiyle açıklanabilir.



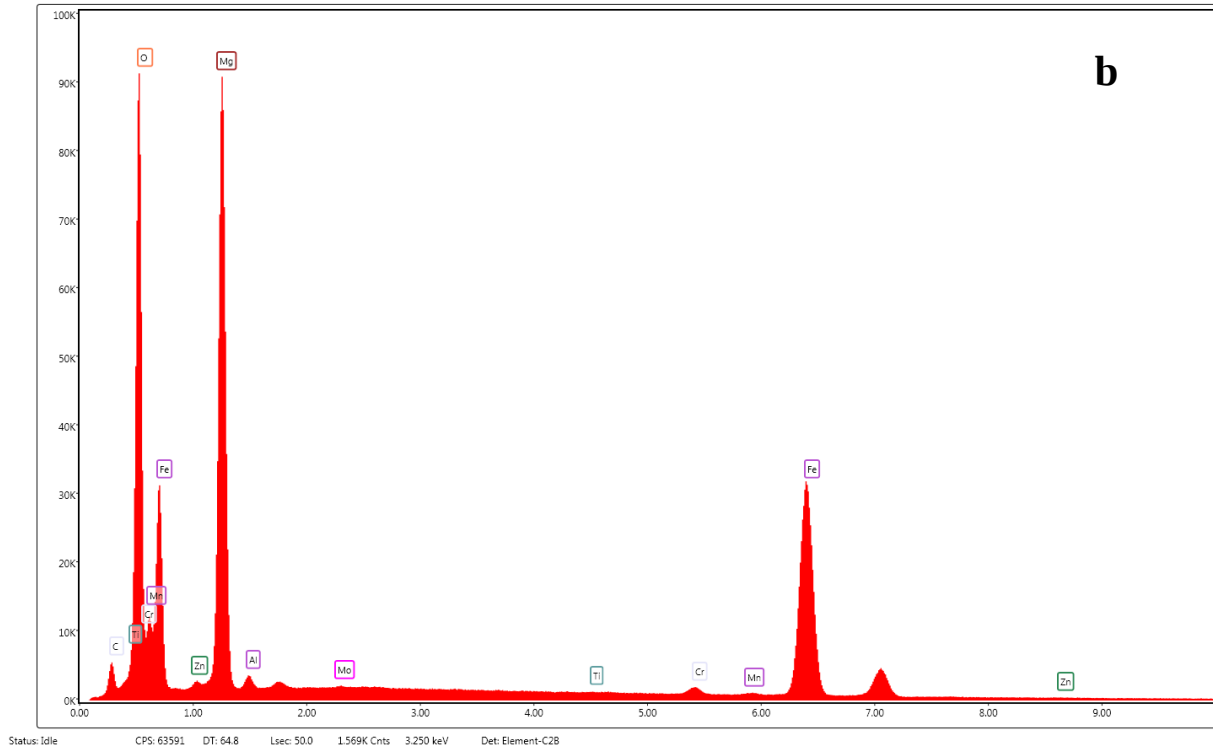
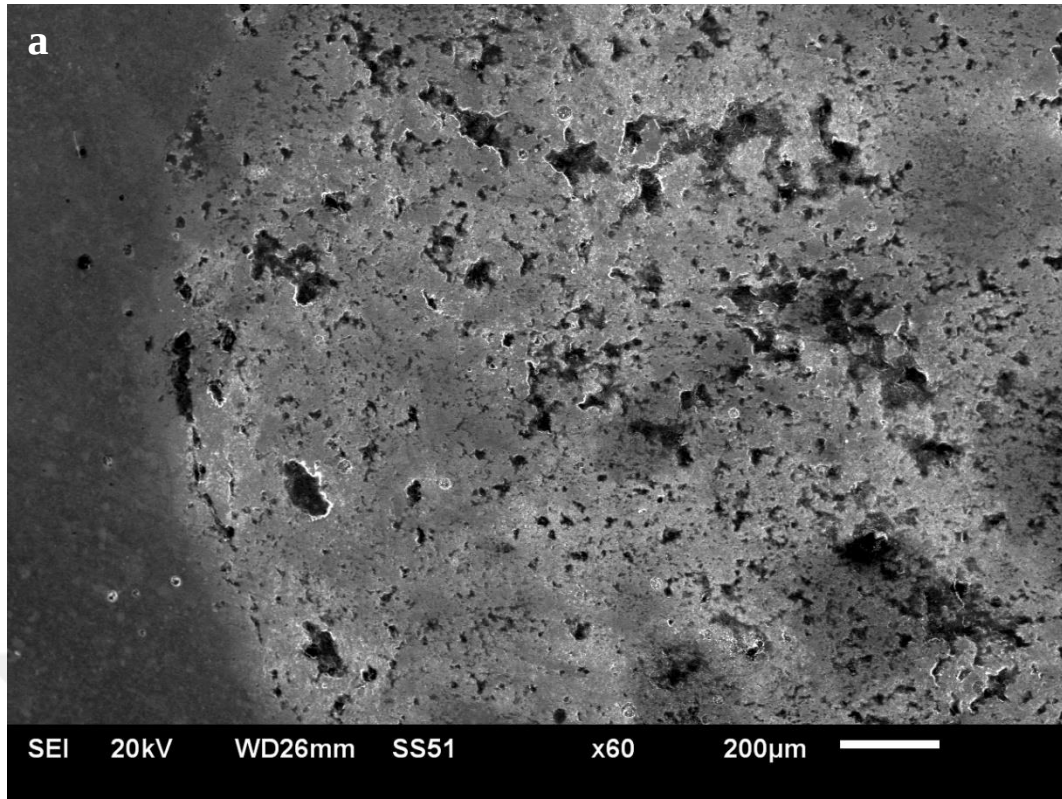
Şekil 48. Çelik bilyenin kaplamasız numuneye 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü



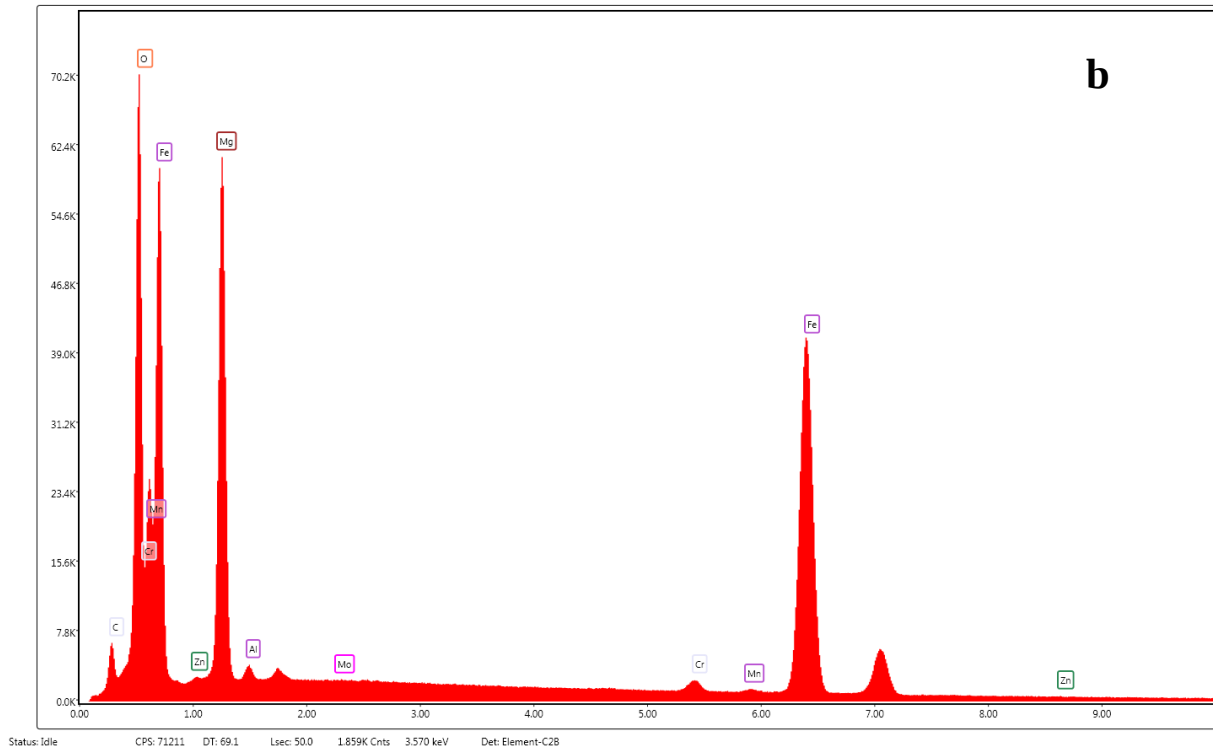
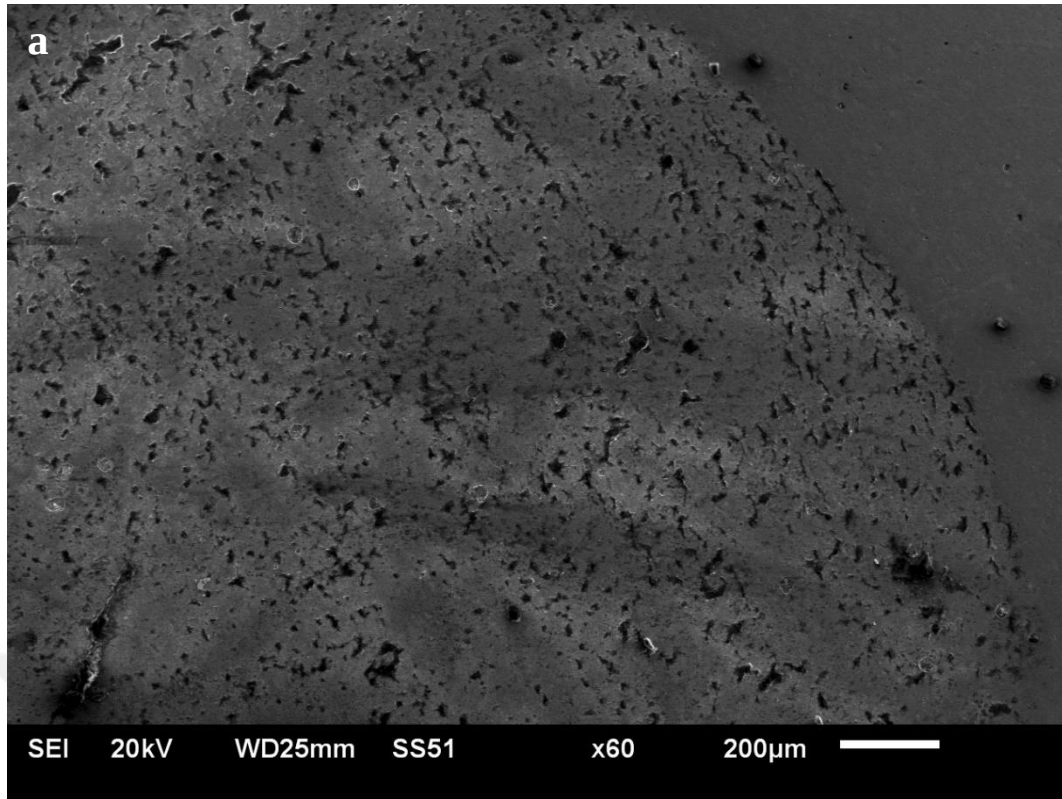
Şekil 49. Çelik bilyenin MoTi kaplamalı numuneye 2,5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü



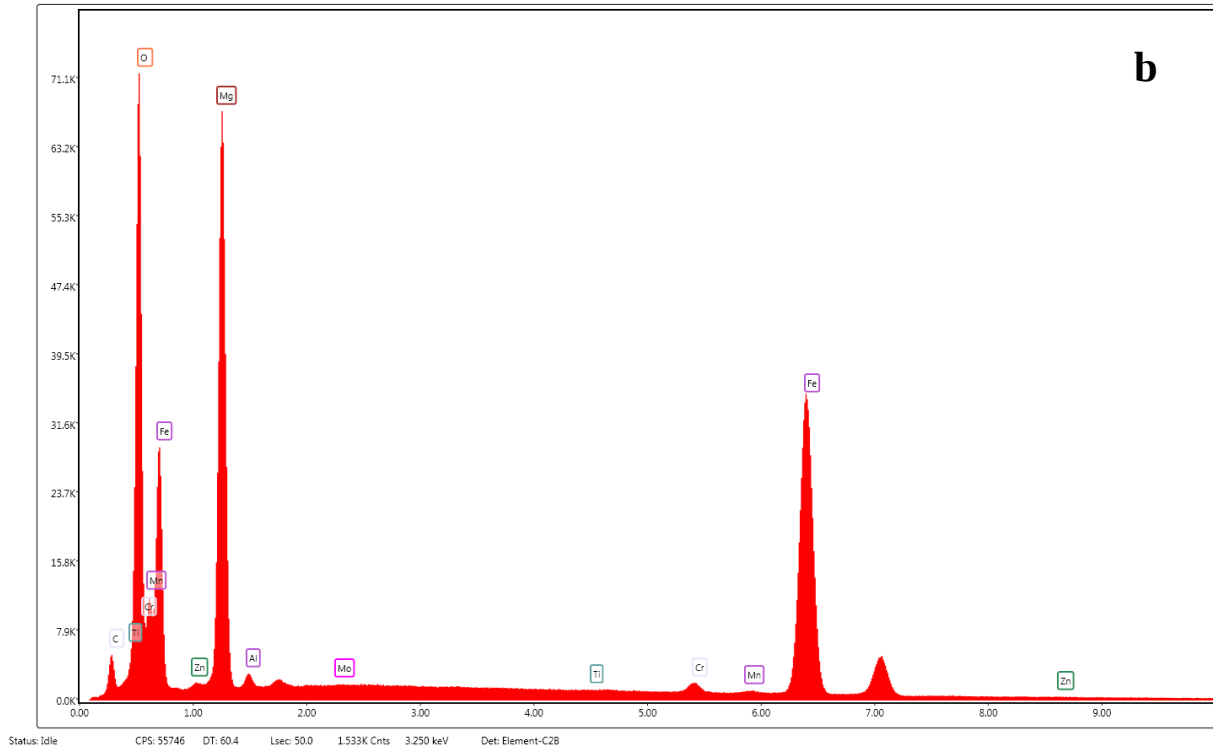
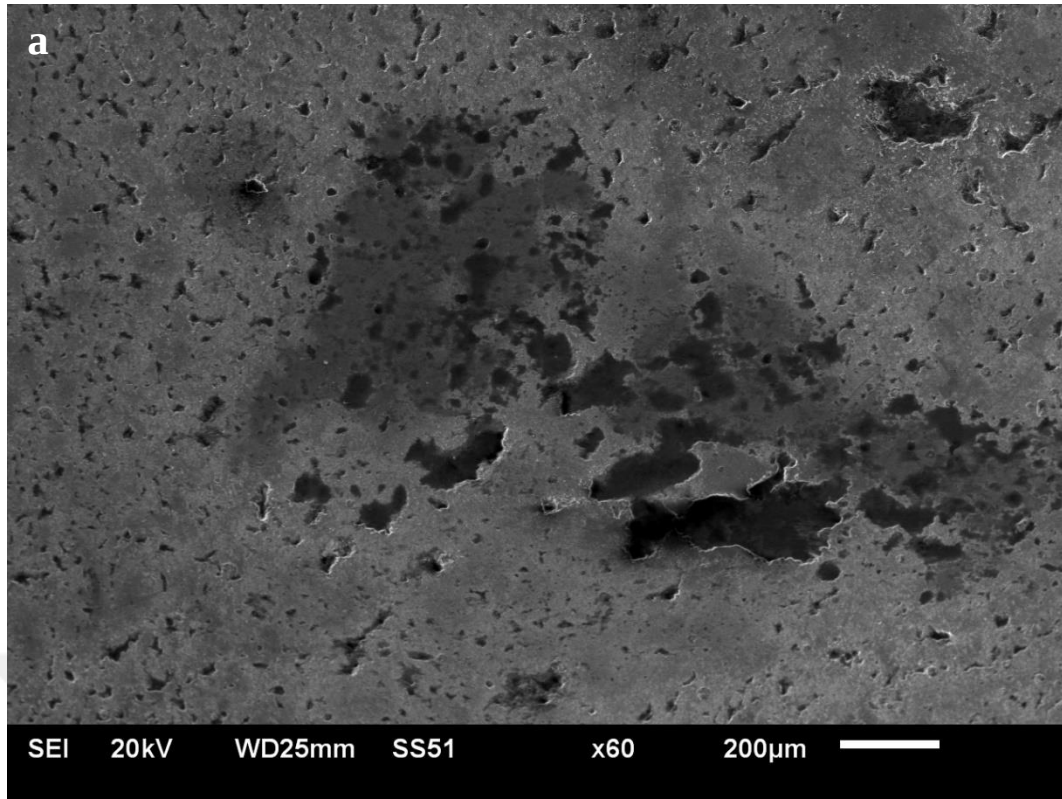
Şekil 50. Çelik bilyenin kaplamasız numuneye 5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü



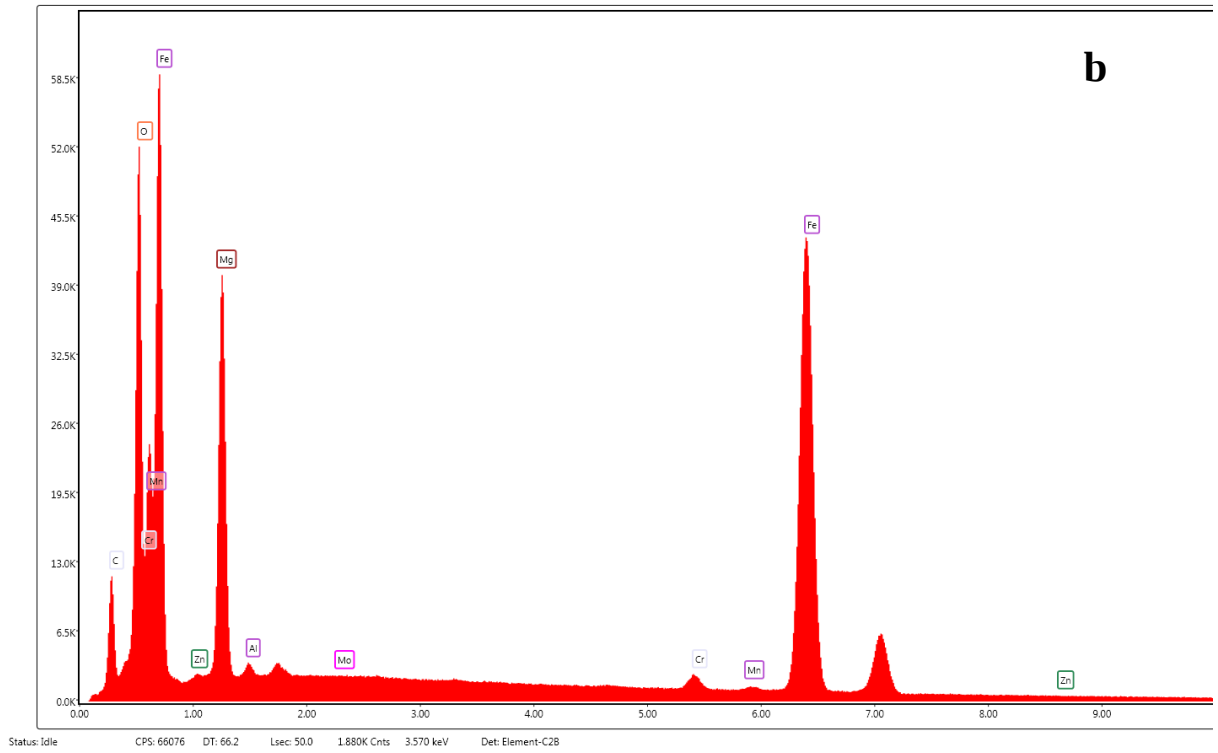
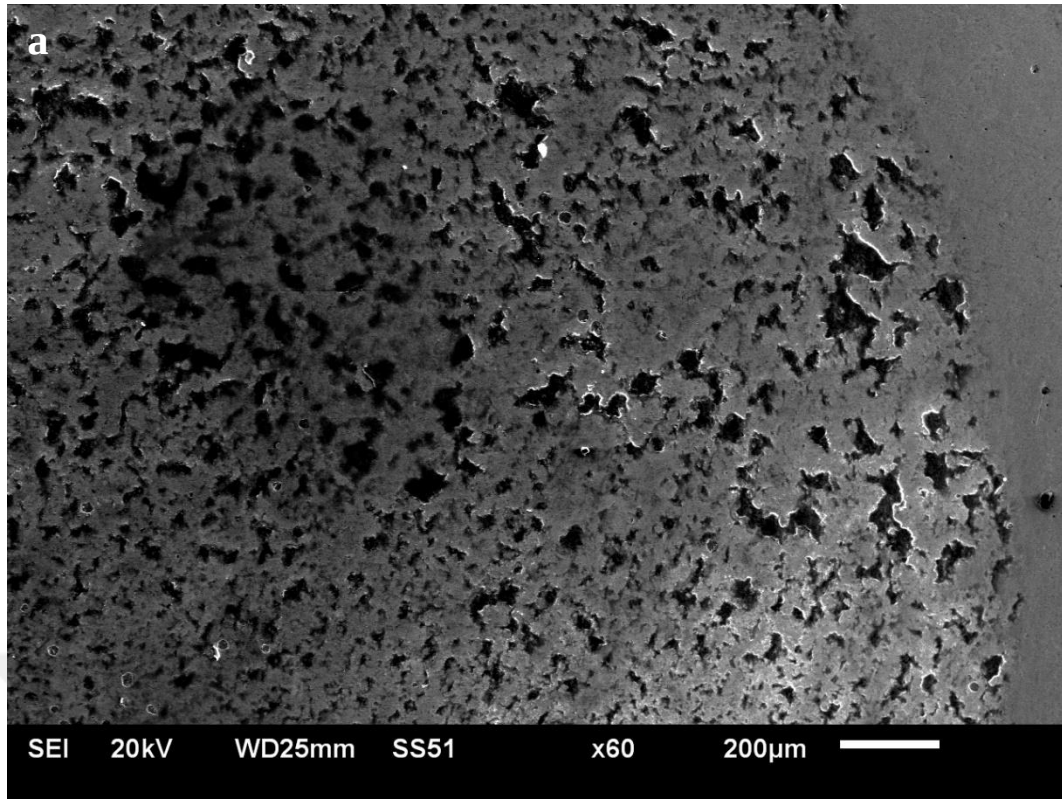
Şekil 51. Çelik bilyenin MoTi kaplamalı numuneye 5 Hz. frekansta 10^4 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü



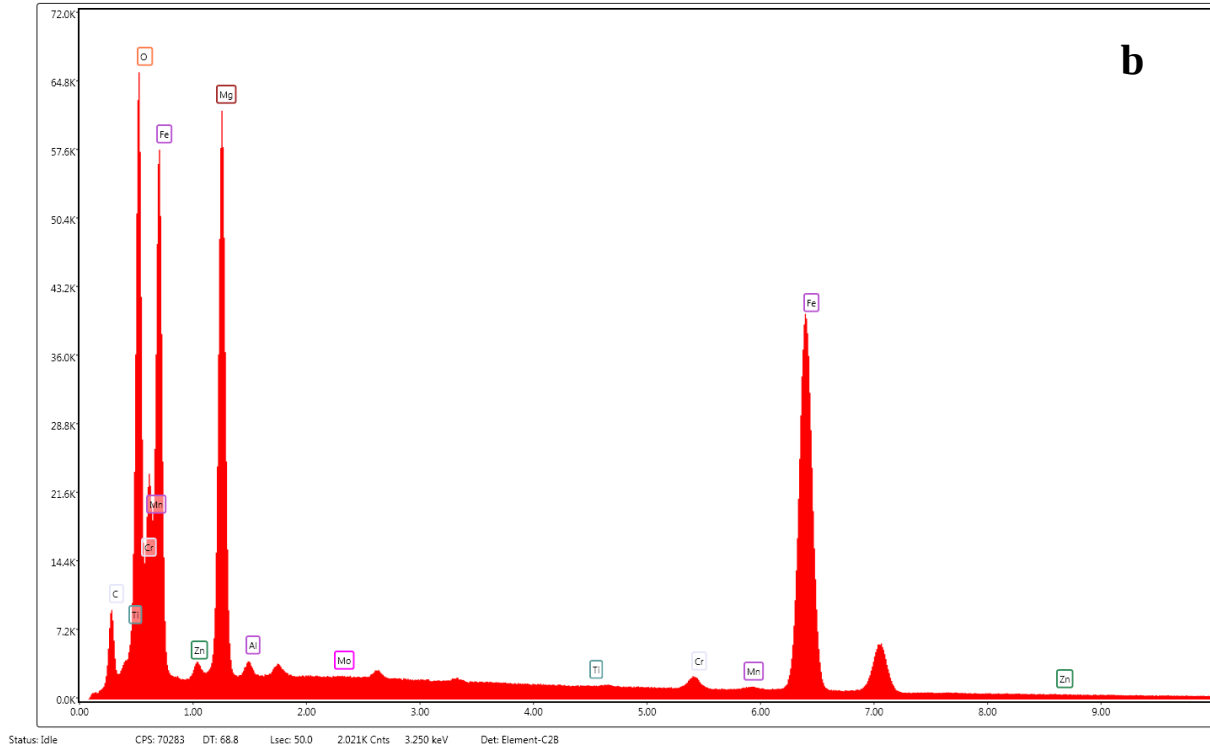
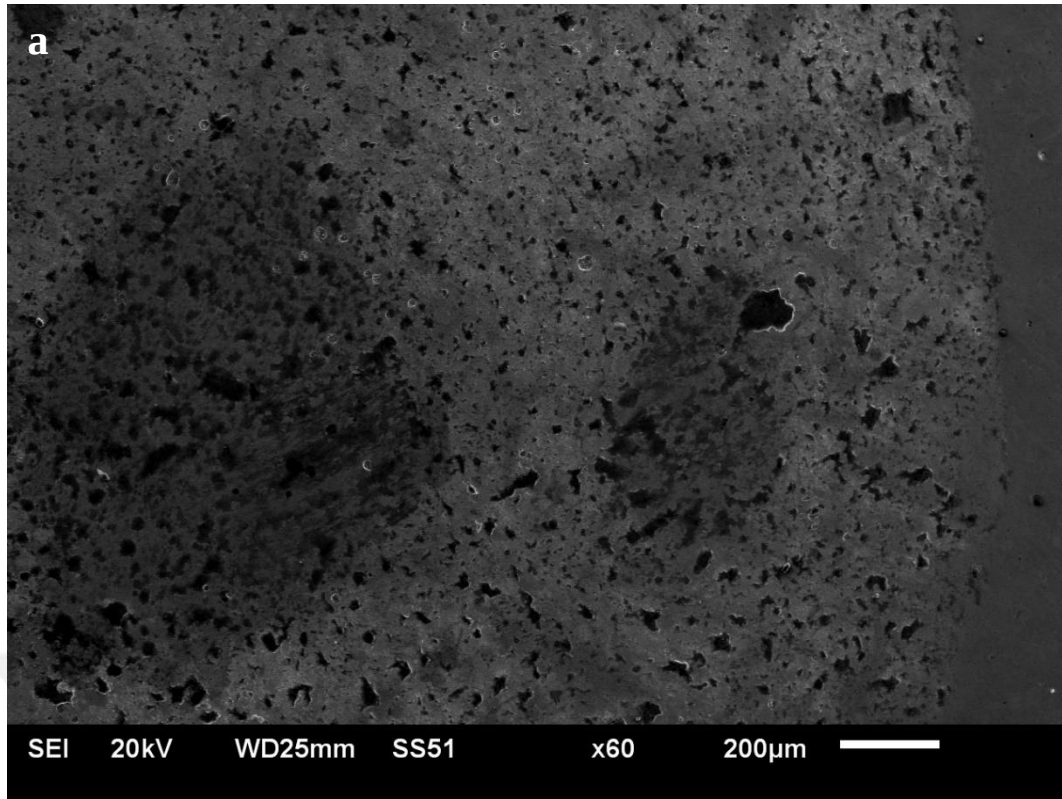
Şekil 52. Çelik bilyenin kaplamasız numuneye 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü



Şekil 53. Çelik bilyenin MoTi kaplamalı numuneye 2,5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü



Şekil 54. Çelik bilyenin kaplamasız numuneye 5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü



Şekil 55. Çelik bilyenin MoTi kaplamalı numuneye 5 Hz. frekansta 10^5 çevrimde SEM ve EDS görüntüsü

Darbe elemanı olan çelik bilyelerden alınan SEM yüzey görüntüleri ve bilye yüzeyinin EDS analizleri şekillerde gösterilmektedir. Testlerin sonunda, çelik bilye çarpma elemanı yüzeyinde bir deformasyon veya aşınma görüntüsü oluşmuştur. Kaplamasız numunelere yapılan darbe testlerinde AZ31 malzemenin bileşenlerinin ve MoTi kaplamalı numunelerin kaplama bileşenlerinin dağılmış parçacıklar halinde çelik bilyenin yüzeyine yapıştığı

görülebılır. Yüzeyin aşınan kısmından örnekler alınmış ve EDS analizleri de şekillerde verilmiştir. Tekrarlanan çarpmalar sonucunda önce kaplamalı yüzeyde bozulmalara neden olmuştur. Frekans ve çevrim sayısıyla birlikte çarpma kuvveti arttıkça daha geniş darbe izleri meydana gelmiştir.



SONUÇLAR

Bu çalışmada magnezyum alaşımı olan AZ31 malzeme yüzeyine DC güç kaynağıyla magnetron sputter yöntemiyle PVD ince film kaplamalar uygulanmıştır. Kaplamalar farklı hedeflerle 4 farklı grup olarak planlanmıştır. Planlanan kaplamalar MoTi, CrMo, Pd, Ti olarak AZ31 numunelerine uygulanmıştır. Kaplanan numuneler 2,5 ve 5 Hz. frekansta ve 10^4 ve 10^5 çevrim sayısında darbeli aşınma deneylerine tabi tutulmuştur.

Endüstriyel uygulamalarda yüzey işlemi olarak sıkça kullanılan ince film kaplamalar magnezyum ve alaşımlarının aşınma ve korozyon dayanımı gibi özelliklerini iyileştirmek için sıkça tercih edilen kaplama tekniklerinden biridir. İnce film kaplamalar uygulanarak malzemelerin istenmeyen özelliklerinin giderilmesi amaçlanır ve malzemenin avantajlarından faydalanmayı sağlamaktadır. Ancak farklı tip kaplama yöntemlerinde farklı sonuçlar da alınmıştır.

Darbeli aşınma deneyleri sonucunda tüm numunelerde darbe elemanı olan çelik bilyenin şekline bağlı olarak kalıcı hasar meydana gelmiştir. Hava ortamında gerçekleşen deneylerde, biriktirme bölgelerinde yüzey bozulmasını hızlandıran sürtünmeler meydana geldi. Artan frekans ve çevrim sayısına bağlı olarak malzeme yüzeyinde daha büyük boyutlarda aşınma kaybı oluşmuş ve kalıcı hasar meydana gelmiştir. Aynı zamanda darbeye maruz kalan malzemede hacim kayıpları da artmıştır. Oluşan sürtünme aşınmaları, tabakalaşma, pullanma, kopma, parçalanma ve delaminasyon şeklinde kendini göstermiştir. Gerçekleştirilen darbe testlerinde numunelerde ve darbe elemanı olan bilyelerde yapılan EDS analizlerinde açığa çıkan elementlerin varlığı, tekrarlı darbeler ile yüzeydeki kaplamaların hasar görmesi nedeniyle taban malzemede ve bilyede tanecikler halinde kalmasıyla açıklanabilir.

DC manyetik alanda sıçratma yöntemiyle yapılan 2,5 ve 5 Hz. frekansta yapılan darbe testlerinde genel olarak kaplamalı numuneler, kaplamasız numunelere göre daha fazla darbe direnci göstermiştir. Kaplamalı numunelere 2,5 ve 5 Hz. frekansta gerçekleştirilen testlerde aşınma, kaplamayı aşarak taban malzemeye kadar ulaşmıştır. Artan frekans ve çevrim ile birlikte numunelerin yüzeyinde daha geniş ve derin izler oluşarak hacim kaybı miktarı artmıştır. 5 Hz. frekansta gerçekleştirilen testlerde, darbe kuvveti ve darbe enerjisi 2,5 Hz.'ten yüksek olduğu için daha büyük aşınma yapıları oluşmuştur.

Hava ortamında kaplamalı ve kaplamasız olarak 2,5 ve 5 Hz. frekans hızlarında yapılan testlerde genel olarak MoTi kaplamalı numunelerin diğer kaplamalara göre daha iyi darbe direnci gösterdiği görüldü.

Darbeli aşınma nedeniyle oluşan kraterlerin boyutları yüzeye uygulanan kaplamaların etkisiyle farklılıklar göstermiştir. Hacim kaybının genel olarak daha az olduğu MoTi kaplamada, ulaşılan sonucun uygulanan kaplama kalınlığının veya tercih edilen katmanların etkisi olmuştur. Bu çalışmalardaki testler sonucunda AZ31 alaşımına uygulanan kaplamaların, darbe dayanımını iyileştirebildiği ve MoTi kaplamanın, bu çalışmadaki diğer test edilen kaplamalara göre daha iyi darbe dayanımı sağladığı sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- Axen, N., Hogmark, S., Jacobson, S., Larsson, M., & Wiklund, U. (2000). Modern Tribology Handbook. Bhushan, B., CRC Pres, Chapters, 13, 19-26.
- Aytaç, A., & Malayoğlu, U. (2018). Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD ince film kaplamaların karşılaştırılması ve DVD kaplama teknolojisinin endüstriyel uygulamaları üzerine kavramsal, akademik ve teorik bir analiz. Savunma Bilimleri Dergisi, 17(1), 131-164.
- Bantle, R. and Matthews, A., 1995. Investigation into the impact wear behaviour of ceramic coatings. Surface and Coatings technology, 74 857-868.
- Bouzakis, K.-D., Maliaris, G. and Makrimalakis, S., 2012. Strain rate effect on the fatigue failure of thin PVD coatings: An investigation by a novel impact tester with adjustable repetitive force. International Journal of Fatigue, 44 89-97.
- Bunshatta, R. F. (1980). High rate physical vapour deposition processes. Agard Lecture Series, (106), 21-26.
- Car, E., 2019. Termal Redüksiyon (Isıl İndirgenme) Yöntemi ile Birincil Magnezyum Üretimi. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası, 188 (1), 40-50.
- Çelik, İ. (2019). Yüzey İşlemi Uygulanmış AZ31 Mg Alaşımının Yapısal Özelliklerinin ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 136-142.
- Duygulu, Ö., 2009. Production and development of wrought magnesium alloys. Istanbul Technical University.
- Engel, P. A., 1979. Impact Wear of Materials. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- Eroğlu, G., 2022. Dünya’da ve Türkiye’de Magnezyum. Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/Turkiyede-dunyada-magnezyum.pdf> (10.01.2024).
- Heinke, W., Leyland, A., Matthews, A., Berg, G., Friedrich, C. and Broszeit, E., 1995. Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests. Thin Solid Films, 270 (1-2), 431-438.
- Horasan, F. N., 2023. Mikro Ark Yöntemiyle TiO₂ Kaplanmış Magnezyum AZ31 Alaşımının Darbeli Aşınma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Huang, J. H., Hsu, C. Y., Chen, S. S., & Yu, G. P. (2003). Effect of substrate bias on the structure and properties of ion-plated ZrN on Si and stainless steel substrates. Materials Chemistry and Physics, 77(1), 14-21.
- Kainer, K.U., 2006. Magnesium alloys and technologies. John Wiley & Sons.
- Knotek, O., Bosserhoff, B., Schrey, A., Leyendecker, T., Lemmer, O. and Esser, S., 1992. A new technique for testing the impact load of thin films: the coating impact test. Surface and Coatings Technology, 54 102-107.
- Kusano, E., Kitagawa, M., Kuroda, Y., Nanto, H., & Kinbara, A. (1998). Adhesion and hardness of compositionally gradient TiO₂/Ti/TiN, ZrO₂/Zr/ZrN, and TiO₂/Ti/Zr/ZrN coatings. Thin Solid Films, 334(1-2), 151-155.

- Özet, M., 2008. Bazı Metallerin RF Magnetron Sıçratma Yöntemiyle TiN ve TiAlN ile Kaplanması. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Pande, S. S., & Patel, S. M. (1984). Investigations on vibratory burnishing process. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 24(3), 195-206.
- Robinson, P. and Davies, G. A. O., 1992. Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites. *International Journal of Impact Engineering*, 12 (2), 189-207.
- Slatter, T., Lewis, R. and Jones, A. H., 2011. The influence of cryogenic processing on wear on the impact wear resistance of low carbon steel and lamellar graphite cast iron. *Wear*, Vol. 271 (9), p.1481-1489.
- Teber, M. (2015). Yüzey Kaplama ile Ti6Al4V Alaşımının Aşınma ve Korozyon Direncinin Artırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Turhan, C.M., 2012. Surface Modification of Mg and Mg Alloys. Der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg zur Erlangung des Grades.
- Yıldız, T., & Gür, A. K. (2006). Aşınma Sistemleri. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 86-91.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Mehmet Safa DERELİOĞLU
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Derince Necip Fazıl Anadolu Lisesi
Lisans:	Bingöl Üniversitesi Makine Mühendisliği
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	