KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İŞLEMSİZ VE NİTRÜRLÜ DİEVAR VE VANADİS 23 ÇELİKLERİNİN TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARINA Al, Cr, C VE Si KATKILI TiN ESASLI KAPLAMALARIN ETKİSİ

DOKTORA TEZİ

Mohammad Javad AZIMI IGDIR

EKİM 2025
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İŞLEMSİZ VE NİTRÜRLÜ DİEVAR VE VANADİS 23 ÇELİKLERİNİN TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARINA Al, Cr, C VE Si KATKILI TiN ESASLI KAPLAMALARIN ETKİSİ

Mohammad Javad AZIMI IGDIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 18 / 09 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 14 / 10 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU

Trabzon 2025

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Mohammad Javad AZIMI IGDIR Tarafından Hazırlanan

İŞLEMSİZ VE NİTRÜRLÜ DİEVAR VE VANADİS 23 ÇELİKLERİNİN TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARINA Al, Cr, C VE Si KATKILI TiN ESASLI KAPLAMALARIN ETKİSİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 25 / 09 / 2025 gün ve 2121 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU…...……

Üye : Prof. Dr. Emin BACAKSIZ …...……

Üye : Prof. Dr. Özlem BARAN ACIMERT ……...……

Üye : Prof. Dr. Hikmet ÇİÇEK …...……

Üye : Doç. Dr. Hüccet KAHRAMANZADE……...……

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitimim kapsamında hazırlanmıştır. Çalışmanın temel amacı, yeni nesil takım çelikleri olan Dievar ve Vanadis 23 üzerine uygulanan yüzey mühendisliği yöntemlerinin mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek ve bu sayede endüstriyel uygulamalara katkı sağlayabilecek sonuçlar ortaya koymaktır.

Doktora sürecim boyunca bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren, her aşamada desteğini esirgemeyen ve engin hoşgörüsüyle yoluma ışık tutan değerli danışmanım Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda katkı ve desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Hüccet KAHRAMANZADE ve Dr. Öğr. Üyesi Yaşar SERT hocalarıma şükranlarımı ifade etmek isterim.

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi tarafından FDK-2023-10908 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Bu destek için de ayrıca teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, sabır ve sevgileriyle bana güç veren canım anneme, babam ve kardeşime en derin şükranlarımı sunar, bu tezi onlara ithaf ederim.

Son olarak, misafirperverlikleri ve sıcak yaklaşımları için Türkiye'ye teşekkür eder, akademik yolculuğumda bana ilham kaynağı olan ve motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan tüm dostlarıma şükranlarımı sunarım.

Mohammad Javad AZIMI IGDIR

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum "İşlemsiz ve Nitrürlü Dievar ve Vanadis 23 Çeliklerinin Tribolojik Davranışlarına Al, Cr, C ve Si katkılı TiN Esaslı Kaplamaların Etkisi" başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU'in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 14/10/2025

Mohammad Javad AZIMI IGDIR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III

TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV

İÇİNDEKİLER V

ÖZET VII

SUMMARY VIII

ŞEKİLLER DİZİNİ IX

TABLOLAR DİZİNİ XVII

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ XVIII

1. GENEL BİLGİLER 1

1.1. Giriş 1

1.2. Dövme Kalıplarında Meydana Gelen Hasar Türleri 2

1.3. Aşınma Mekanizmaları 5

1.3.1. Adezif Aşınması 5

1.3.2. Abrazif Aşınması 6

1.3.3. Yorulma Aşınması 6

1.3.4. Korozif Aşınma 7

1.4. Dövme Kalıplarında Hasar Mekanizmalarının Kontrolü ve Önlenmesi 8

1.5. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemleri 12

1.6. Endüstriyel Uygulamalarda İnce Film ve Sert Kaplamalardaki Gelişmeler 17

1.6.1. TiN Kaplamalar 19

1.6.2. TiAlN Kaplamalar 20

1.6.3. TiCN Kaplamalar 20

1.6.4. TiSiN Kaplamalar 20

1.6.5. TiAlCrN Kaplamalar 21

1.6.6. Çalışma Amacı ve Kapsamı 21

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 23
2.1. Numunelerin Hazırlanması 23
2.2. Nitrürleme İşlemi 24
2.3. Kaplama İşlemi ve Parametreleri 26
2.4. Yapısal İncelemeler 27
2.5. Çizik Deney İncelemeleri 27
2.6. Nanosertlik İncelemeleri 28
2.7. Bilye-Disk Aşınma Testleri 29
2.8. Darbeli-Kayma Testleri 30
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 32
3.1. Kaplamaların Yüzey Özellikleri ve Kesit Morfolojilerinin İncelenmesi 32
3.1.1. Yüzey Pürüzlülüğü Analizleri 37
3.1.2. Kaplamaların Kesit Morfolojilerinin İncelenmesi 39
3.2. XRD İncelemeleri 46
3.3. Sertlik Testi Analizleri 51
3.4. Çizik Testi Bulguları 56
3.5. Bilye-Disk Aşınma Testi Analizeri 68
3.6. Darbeli Kayma Aşınma Testi Bulguları 106
4. SONUÇLAR 130
5. ÖNERİLER 132
6. KAYNAKLAR 133
ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

İŞLEMSİZ VE NİTRÜRLÜ DİEVAR VE VANADİS 23 ÇELİKLERİNİN TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARINA Al, Cr, C VE Si KATKILI TiN ESASLI KAPLAMALARIN ETKİSİ

Mohammad Javad AZIMI IGDIR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU
2025,141 Sayfa

Yeni nesil çeliklerden Vanadis 23 ve Dievar, üstün mekanik özellikleri sayesinde dövme kalıplarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak yüksek maliyetlerine rağmen kullanım ömürleri sınırlı kaldığından yüzey mühendisliği yöntemleriyle iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, söz konusu çeliklerin tribolojik performanslarının artırılması amacıyla nitrürleme işlemi ile TiN esaslı ve Al, Cr, C, Si katkılı nanokompozit kaplamalar katodik ark buharlaştırma PVD yöntemiyle kaplanmıştır. Numuneler mikroyapısal, nanosertlik, çizik ve tribolojik testlerle incelenmiştir. Bulgular, nitrürlemenin yüzey sertliğini artırarak kaplama-taban malzeme etkileşimini bazı kaplamalarda olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Taban malzemelerin 10-18 GPa olan sertlikleri TiAlCrN kaplamalarda 52-54 GPa'a yükselmiştir. Kaplamasız Dievar çeliğine kıyasla TiCN kaplamalar, sürtünme katsayısını 0,30'dan 0,19-0,23 aralığına düşürmüş ve aşınma direncini yaklaşık 20 kat artırarak tribolojik performansı önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu sonuçlar, nitrürleme ile desteklenen çok bileşenli kaplamaların Dievar ve Vanadis 23 çeliklerinin yüzey sertliği ve aşınma performansını belirgin biçimde geliştirdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Vanadis 23, Dievar, Nanosertlik, Katodik ark buharlaştırma PVD, Triboloji.

PhD. Thesis

SUMMARY

EFFECT OF TiN BASED COATINGS DOPED WITH Al, Cr, C AND Si ON THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF UNTREATED AND NITRIDED DIEVAR AND VANADIS 23 STEELS

Mohammad Javad AZIMI IGDIR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU
2025, 141 Pages,

Vanadis 23 and Dievar, as new-generation steels, are widely used in forging dies owing to their superior mechanical properties. However, despite their high cost, their service life remains limited, necessitating improvement through surface engineering methods. In this study, to enhance the tribological performance of these steels, TiN-based nanocomposite coatings doped with Al, Cr, C, and Si were deposited by cathodic arc evaporation PVD in conjunction with a nitriding pretreatment. The specimens were examined by microstructural analysis, nanoindentation, scratch testing, and tribological measurements. The findings show that nitriding increases surface hardness and, in some coatings, favorably influences the coating–substrate interaction. The hardness of the base materials, initially 10–18 GPa, rose to 52–54 GPa with TiAlCrN coatings. Compared with uncoated Dievar steel, TiCN coatings reduced the coefficient of friction from 0.30 to 0.19–0.23 and increased wear resistance by approximately twentyfold, thereby markedly improving tribological performance. These results indicate that nitriding-assisted multicomponent coatings substantially enhance the surface hardness and wear performance of Dievar and Vanadis 23 steels.

Key Words: Vanadis 23, Dievar, Nano-hardness, Cathodic Arc PVD, Tribology.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Dövme kalıplarında meydana gelen başlıca hasar tipleri 3
Şekil 2. Dövme kalıplarında karşılaşılan hasar türleri ve sıklıklarının dağılımı..... 4
Şekil 3. Dövme kalıplarında aşınma türleri ve oranları. 5
Şekil 4. Adezif aşınmanın oluşum mekanizmasının şematik gösterimi 6
Şekil 5. Abrazif aşınma gösterimi..... 6
Şekil 6. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi 7
Şekil 7. Korozif aşınma mekanizmasının şematik temsili 8
Şekil 8. Nitrasyon işlemine ait görsel 9
Şekil 9. İşlem sıcaklığı ve kaplama kalınlığına göre kaplama sınıflandırılması..... 10
Şekil 10. PVD kaplaması ve nitrür difüzyon tabakasından oluşan hibrit kaplamanın yapısı 12
Şekil 11. Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerine ait genel şematik görünüm 13
Şekil 12. Katodik ark buharlaştırma tekniğinin temel prensiplerinin şematik temsili 15
Şekil 13. Nitrürlenmiş kalıp çeliklerinin kesit görüntüleri a) Dievar b) Vanadis 23 25
Şekil 14. Nitrürlenmiş malzemelerin alınan sertlik değerinin görüntüsü. a) Dievar, b) Vanadis 23 25
Şekil 15. Kaplamaların çizik testine ait şematik görünüm 28
Şekil 16. Nanosertlik ölçüm yöntemine ait şematik görünüm 29
Şekil 17. Deneylerde kullanılan tribometreye ait fotoğraf..... 30
Şekil 18. Darbeli-kayma aşınma test düzeneğinin şematik görünümü 31
Şekil 19. TiN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar ,b) Dievar Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü 33
Şekil 20. TiAlN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar, b) Dievar Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü 33
Şekil 21. TiCN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar, b) Dievar Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü. 34
Şekil 22. TiSiN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar, b) Dievar nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü 34
Şekil 23. TiAlCrN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar, b) Dievar nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü 35
Şekil 24. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin grafiği 37

Şekil 25. TiN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar-Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü. 40
Şekil 26. TiAlN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar-Nitrürlü, c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23-Nitrürlü 41
Şekil 27. TiCN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar-Nitrürlü, c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23-Nitrürlü. 42
Şekil 28. TiSiN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar nitrürlü, c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü. 43
Şekil 29. TiAlCrN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar-Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23-Nitrürlü. 44
Şekil 30. Tüm kaplamalara ait olan kaplama kalınlıkları 45
Şekil 31. Dievar ve Vanadis 23 çeliklerinin işlemsiz ve nitrürlenmiş hallerine ait XRD desenleri 47
Şekil 32. TiN kaplamaya ait XRD desenleri. 47
Şekil 33. TiAlN kaplamaya ait XRD desenleri 48
Şekil 34. TiCN kaplamaya ait XRD desenleri 48
Şekil 35. TiSiN kaplamaya ait XRD desenleri 49
Şekil 36. TiAlCrN kaplamaya ait XRD desenleri. 49
Şekil 37. Taban malzemeler ve TiN kaplamaların nanosertlik değerleri 52
Şekil 38. Taban malzemeler ve TiAlN kaplamaların nanosertlik değerleri 52
Şekil 39. Taban malzemeler ve TiCN kaplamaların nanosertlik değerleri 53
Şekil 40. Taban malzemeler ve TiSiN kaplamaların nanosertlik değerleri 53
Şekil 41. Taban malzemeler ve TiAlCrN kaplamaların nanosertlik değerleri 54
Şekil 42. Taban malzemeler ve Tum Numunelerin nanosertlik değerleri 54
Şekil 43. Tüm kaplamaların Çizik deneyinde elde edilen adezyon dayanımı. 56
Şekil 44. TiN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği 58
Şekil 45. TiN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği 59
Şekil 46. TiN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği 59
Şekil 47. TiN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiği 60
Şekil 48. TiAlN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği 60
Şekil 49. TiAlN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği 61
Şekil 50. TiAlN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği 61
Şekil 51. TiAlN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiği 62

Şekil 52. TiCN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği 62
Şekil 53. TiCN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği..... 63
Şekil 54. TiCN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği..... 63
Şekil 55. TiCN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiği 64
Şekil 56. TiSiN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği..... 64
Şekil 57. TiSiN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği..... 65
Şekil 58. TiSiN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği 65
Şekil 59. TiSiN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiğ 66
Şekil 60. TiAlCrN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği 66
Şekil 61. TiAlCrN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği..... 67
Şekil 62. TiAlCrN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği..... 67
Şekil 63. TiAlCrN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiği 68
Şekil 64. Taban malzemeler, işlemsiz ve Nitrürlenmiş, numunelerin sürtünme katsayısının grafiği..... 69
Şekil 65. TiN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği..... 69
Şekil 66. TiAlN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği..... 70
Şekil 67. TiCN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği 70
Şekil 68. TiSiN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği 71
Şekil 69. TiAlCrN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği 71
Şekil 70. İşlemsiz Dievar numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 74
Şekil 71. Dievar-Nitrürlü numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 74
Şekil 72. İşlemsiz Vanadis23 numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 75
Şekil 73. Vanadis23 numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 75
Şekil 74. D-TiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü..... 76
Şekil 75. D-N-TiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 76
Şekil 76. V-TiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü..... 77
Şekil 77. V-N-TiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 77

Şekil 78. D-TiAlN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 78
Şekil 79. D-N-TiAlN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 78
Şekil 80. V-TiAlN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 79
Şekil 81. V-N-TiAlN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 79
Şekil 82. D-TiCN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 80
Şekil 83. D-N-TiCN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 80
Şekil 84. V-TiCN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 81
Şekil 85. V-N-TiCN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 81
Şekil 86. D-TiSiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 82
Şekil 87. D-N-TiSN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 82
Şekil 88. V-TiSiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 83
Şekil 89. V-N-TiSiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 83
Şekil 90. D-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 84
Şekil 91. D-N-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 84
Şekil 92. V-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 85
Şekil 93. V-N-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü 85
Şekil 94. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiN kaplamaların aşınma oranları 86
Şekil 95. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiAlN kaplamaların aşınma oranları 87
Şekil 96. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiCN kaplamaların aşınma oranları 87
Şekil 97. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiSiN kaplamaların aşınma oranları 88
Şekil 98. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiAlCrN kaplamaların aşınma oranları 88
Şekil 99. Tum numunelerden elde edilen aşınma oranları 89
Şekil 100. Tum numunelerden elde edilen aşınma oranları 89
Şekil 101. Dievar çeliği- taban malzeme numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 91
Şekil 102. Dievar-Nitrürlü numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 92

Şekil 103. Vanadis 23- taban malzeme numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 92
Şekil 104. Vanadis 23-Nitrürlü numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 93
Şekil 105 D-TiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 93
Şekil 106. D-N-TiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 94
Şekil 107. V-TiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 94
Şekil 108. V-N-TiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 95
Şekil 109. D-TiAlN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 95
Şekil 110. D-N-TiAlN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 96
Şekil 111. V-TiAlN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 96
Şekil 112. V-N-TiAlN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 97
Şekil 113. D-TiCN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 97
Şekil 114. D-N-TiCN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 98
Şekil 115. V-TiCN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 98
Şekil 116. V-N-TiCN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 99
Şekil 117. D-TiSiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 99
Şekil 118. D-N-TiSiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 100
Şekil 119. V-TiSiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 100
Şekil 120. V-N-TiSiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 101
Şekil 121. D-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 101
Şekil 122. D-N-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 102

Şekil 123. V-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 102
Şekil 124. V-N-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi 103
Şekil 125. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği 106
Şekil 126. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiAlN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği 107
Şekil 127. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiCN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği 107
Şekil 128. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiSiN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği 108
Şekil 129. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiAlCrN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği 108
Şekil 130. Tüm numunelerin darbeli-kayma aşınma hacim kayıp grafiği 109
Şekil 131. Tüm numunelerin darbeli-kayma aşınma hacim kayıp grafiği 109
Şekil 132. İşlemsiz Dievar taban malzemesinin darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 112
Şekil 133. Nitrürlü Dievar taban malzemesinin darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 112
Şekil 134. İşlemsiz Vanadis 23 taban malzemesinin darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 112
Şekil 135. Nitrürülü Vanadis 23 taban malzemesinin darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 113
Şekil 136. D-TiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 113
Şekil 137. D-N-TiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 113
Şekil 138. V-TiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 114
Şekil 139. V-N-TiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 114
Şekil 140. D-TiAlN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 114
Şekil 141. D-N-TiAlN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 115
Şekil 142. V-TiAlN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 115
Şekil 143. V-N-TiAlN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 115

Şekil 144. D-TiCN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 116
Şekil 145. D-N-TiCN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 116
Şekil 146. V-TiCN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 116
Şekil 147. V-N-TiCN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 117
Şekil 148. D-TiSiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 117
Şekil 149. D-N-TiSiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 117
Şekil 150. V-TiSiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 118
Şekil 151. V-N-TiSiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 118
Şekil 152. D-TiAlCrN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 118
Şekil 153. D-N-TiAlCrN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 119
Şekil 154. V-TiAlCrN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 119
Şekil 155. V-N-TiAlCrN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü 119
Şekil 156. Dievar numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 120
Şekil 157. Dieavr-N numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 120
Şekil 158. Vanadis numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 120
Şekil 159. Vanadis-N numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 121
Şekil 160. D-TiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 121
Şekil 161. D-N-TiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 121
Şekil 162. V-TiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 122
Şekil 163. V-N-TiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 122

Şekil 164. D-TiAlN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 122
Şekil 165. D-N-TiAlN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 123
Şekil 166. V-TiAlN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 123
Şekil 167. V-N-TiAlN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 123
Şekil 168. D-TiCN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 124
Şekil 169. D-N-TiCN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 124
Şekil 170. V-TiCN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 124
Şekil 171. V-N-TiCN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 125
Şekil 172. D-TiSiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 125
Şekil 173. D-N-TiSiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 125
Şekil 174. V-TiSiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 126
Şekil 175. V-N-TiSiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 126
Şekil 176. D-TiAlCrN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 126
Şekil 177. D-N-TiAlCrN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 127
Şekil 178. V-TiAlCrN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 127
Şekil 179. V-N-TiAlCrN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi 127

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Vanadis23 ve Dievar çeliğinin kimyasal bileşimi % ağırlık 23
Tablo 2. Kaplamalara ait katodik ark buharlaştırma (PVD) işlem parametreleri 26
Tablo 3. Numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri 72

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2θ $(2-theta)$: XRD ölçümlerinde kırınım açısı

A : Amper

Å : Angström (1 Å = 10^{-10} m)

Al : Alüminyum (element)

Al_2O_3 : Alüminyum oksit

$\alpha - Fe$: Ferrit fazı (alfa demir); XRD desenlerinde raporlandı

C : Karbon (element)

CVD : Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)

Dievar : Uddeholm Dievar sıcak iş takım çeliği

EDS : Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağılımlı Spektroskopi)

EDM : Electrical Discharge Machining (Elektro erozyon ile kesim)

ε-$Fe_{2-3}N$: Epsilon demir nitrür fazı

FCC (YMK) : Yüzey merkezli kübik kristal yapı

Fe_3N : Demir nitrür fazı

EDM : Electrical Discharge Machining (Elektro erozyon ile kesim)

FCC (YMK) : Yüzey merkezli kübik kristal yapı

Fe_4N (γ′) : Gamma-prime demir nitrür fazı

HV : Vickers Sertlik Değeri

λ : X-ışını dalga boyu (CuKα için λ = 1,5405 Å)

N : Azot (element)

N (Newton) : Kuvvet birimi; çizik testinde uygulanan yük

PVD : Physical Vapor Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)

SCCM : Standart cm^3/dk (gaz akış hızı birimi)

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

SiC : Silisyum karbür

Ti : Titanyum

TiAlCrN : Titanyum-Alüminyum-Krom Nitrür kaplama

TiAlN : Titanyum-Alüminyum Nitrür kaplama

TiCN : Titanyum Karbonitrür kaplama

TiN : Titanyum Nitrür kaplama

TiSiN : Titanyum Silisyum Nitrür kaplama

Vanadis 23 : Uddeholm Vanadis 23 toz metalurjisi çeliği

V (Volt) : Gerilim

μm : Mikrometre

°C : Santigrat derece

XRD : X-Işını Kırınımı (faz/kristal yapı analizi)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüz dünyasında sanayi, yalnızca ekonomik kalkınmanın değil, aynı zamanda toplumsal refahın, teknolojik ilerlemenin ve günlük yaşamın sürdürülebilirliğinin temel taşlarından birini oluşturmaktadır. Teknolojinin baş döndürücü bir hızla gelişmesi, dünya nüfusunun geçmiş on yıllara kıyasla önemli ölçüde artması ve doğal kaynakların sınırlı oluşu, üretim süreçlerinde verimliliğin artırılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Dolayısıyla modern endüstrinin en temel hedeflerinden biri, yüksek kaliteye sahip ürünleri ekonomik şekilde üretmek ve kullanılan parçaların hizmet ömrünü mümkün olduğunca uzatmak olmuştur.

Sanayinin farklı kollarında, özellikle otomotiv, makine imalatı ve metal şekillendirme sektörlerinde yaygın olarak kullanılan sıcak ve soğuk dövme kalıpları, üretim zincirinin kritik unsurlarından biridir. Ancak bu kalıplar, yüksek sıcaklık, basınç ve sürekli tekrarlanan mekanik yükler altında çalıştıklarından; aşınma, yorulma ve çeşitli hasar mekanizmalarına sürekli maruz kalmaktadır. Ortaya çıkan bu durum, üretim hatlarının güvenilirliği ve verimliliği açısından doğrudan bir tehdit oluşturmaktadır. Böyle koşullarda endüstrinin önünde iki seçenek bulunmaktadır. İlki, hasar görmüş kalıpların tamamen yenileriyle değiştirilmesidir. Ancak kalıp üretiminin yüksek maliyetli ve zaman alan bir süreç olması, ayrıca değişim sırasında üretim hatlarının durması işletmeler açısından ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır. İkinci seçenek ise mevcut kalıpların hizmet ömrünü uzatmaya yönelik çözümler geliştirmektir. Bu yaklaşım, maliyetleri azaltmak ve üretim sürekliliğini sağlamak bakımından çok daha sürdürülebilir bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, kalıp ve takım çeliklerinin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, aşınma direncinin artırılması ve kullanım ömrünün uzatılması günümüz malzeme mühendisliğinin en önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Modern üretim sistemlerinde kalite, verimlilik ve rekabet gücü doğrudan kullanılan malzemelerin performansına bağlıdır. Bu noktada yalnızca yeni malzemelerin geliştirilmesi değil, mevcut malzemelerin yüzey modifikasyonu ve kaplama teknikleriyle iyileştirilmesi de büyük önem taşımaktadır.

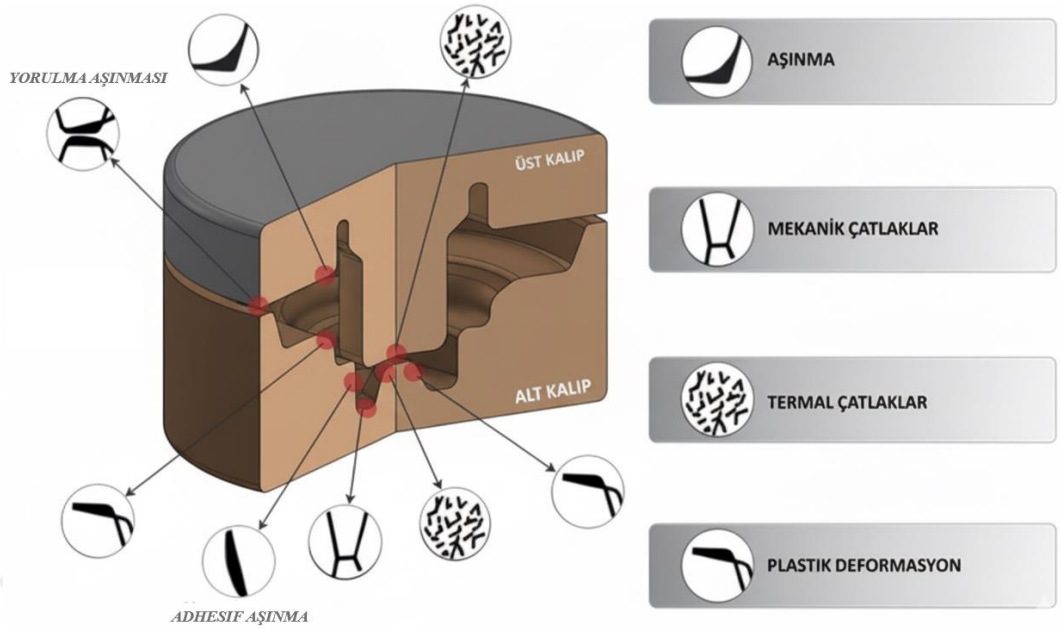
Bu tez çalışmasında, öncelikle dövme kalıplarında karşılaşılan başlıca aşınma ve hasar mekanizmaları ayrıntılı biçimde ele alınacaktır. Daha sonra, bu sorunların üstesinden gelmek

için geliştirilen farklı teknikler değerlendirilecek ve takım çeliklerinin ömrünün uzatılması ile endüstriyel verimliliğin artırılması yönünde öneriler sunulacaktır.

1.2. Dövme Kalıplarında Meydana Gelen Hasar Türleri

Dövme kalıpları, yüksek sıcaklık ve sürekli tekrarlanan mekanik yüklerin etkisiyle aşınma, plastik şekil değişimi, çatlak oluşumu ve yorulma gibi farklı hasar mekanizmalarına maruz kalmaktadır. Aşınma süreci genellikle yüzeyde mikro boyutlarda başlamakta, tekrarlayan gerilmeler sonucunda ise makro ölçekte çatlaklara dönüşerek ilerlemektedir. Bu tür hasarlar, kalıp ömrünün kısalmasına ve üretim maliyetlerinin artmasına yol açan temel etkenlerdir. Koruyucu kaplama gibi önleyici uygulamalara rağmen, kalıpların hizmet ömrü bu mekanizmalar tarafından önemli ölçüde sınırlandırılmaktadır (Emamverdian vd., 2021).

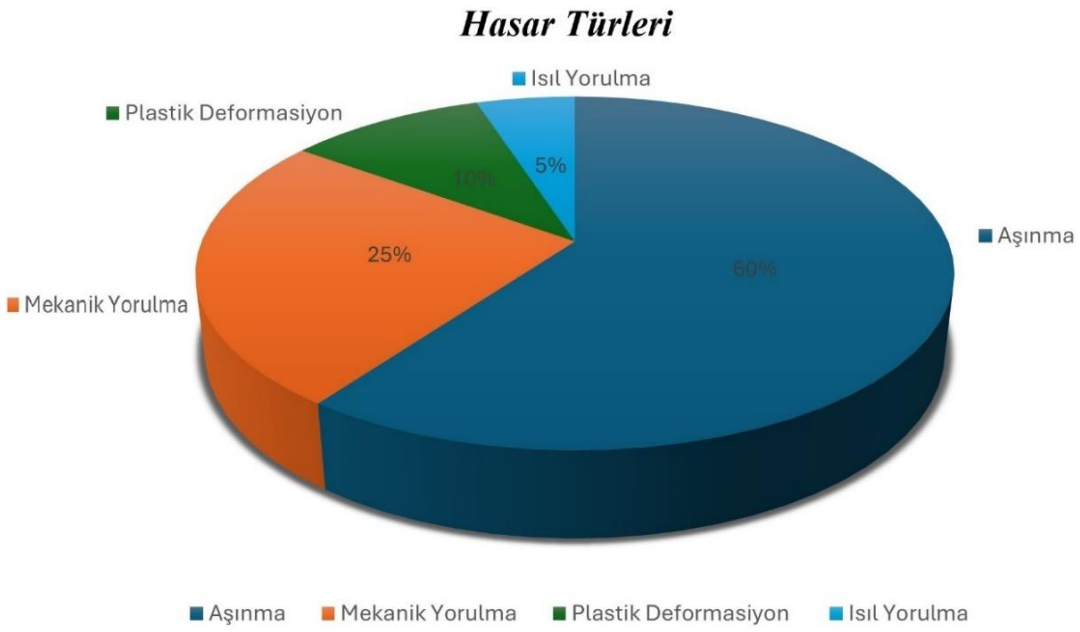
Üretim sürecinde kalıplar farklı gerilme koşullarına maruz kaldığından, çeşitli hasar türleri gelişmektedir. Şekil 1'de dövme kalıplarında en sık karşılaşılan hasar tipleri özetlenmiştir. Bunlar arasında aşınma, kalıp yüzeylerinde en yaygın görülen türdür ve malzeme kaybına neden olarak yüzey kalitesini düşürür. Mekanik çatlaklar, tekrarlayan yüklerin etkisiyle oluşur ve genellikle yorulma kaynaklıdır. Termal çatlaklar, sıcaklık değişimlerinden doğan ısıl gerilmeler sonucunda ağsı bir yapı halinde yüzeyde görülür. Plastik deformasyon ise yüksek sıcaklık ve basınç altında malzemenin kalıcı şekil değişimine uğramasıyla ortaya çıkar. Bu hasarların her biri, kalıpların kullanım ömrünü kısaltmakta ve üretim verimliliği üzerinde doğrudan olumsuz etki göstermektedir (Podgornik & Leskovšek, 2015; Sert, 2022; Yeşilyurt, 2021).



Şekil 1. Dövme kalıplarında meydana gelen başlıca hasar tipleri (Podgornik & Leskovšek, 2015; Yilkiran vd., 2012)

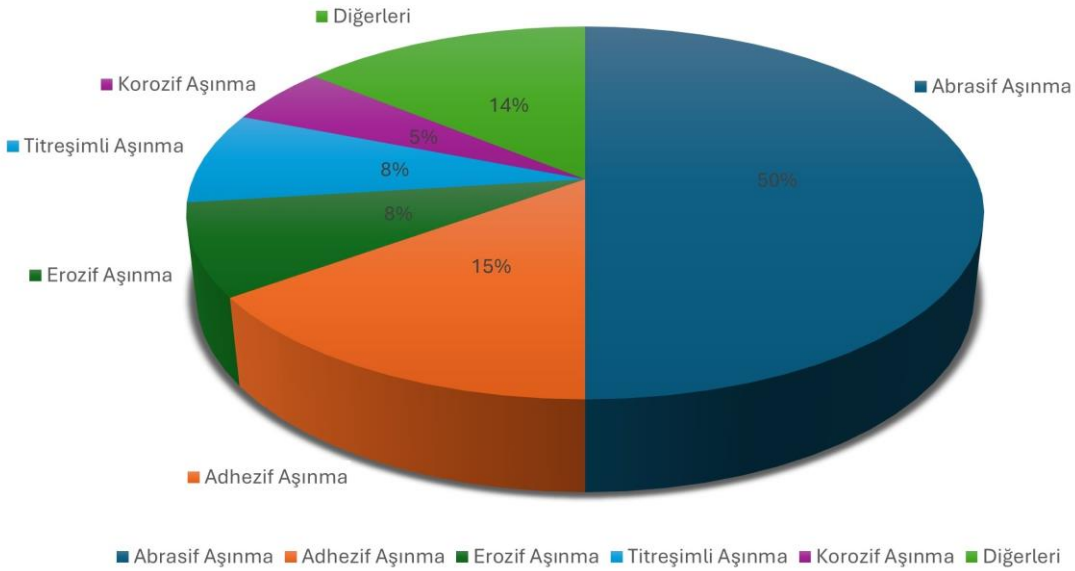
Yapılan incelemeler, dövme kalıplarındaki düşük dayanıklılığın en önemli nedeninin yüzey aşınmaları olduğunu ortaya koymaktadır. Bu aşınmalar özellikle en büyük deformasyonun meydana geldiği bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Çalışma yüzeylerinde oluşan hasarlar, kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi artırmakta; bunun sonucunda malzemenin kalıp yüzeyine yapışması kolaylaşmakta ve yüzey sıcaklığı hızla yükselmektedir. Ayrıca kalıp malzemesi ile dövülen malzemenin benzer kimyasal bileşimlere sahip olması, yapışma eğilimini daha da artırmaktadır (Buchmayr, 2017; Hawryluk vd., 2018).

Şekil 2'de de görüldüğü üzere, dövme kalıplarında en yaygın hasar türü aşınmadır. Triboloji alanında aşınma, en çok araştırılan konulardan biridir. İki yüzeyin temasında mekanik veya kimyasal etkilerle malzeme kaybı gerçekleşir. Bu durum yalnızca malzemenin zayıflamasına yol açmaz, aynı zamanda artan sürtünme nedeniyle enerji verimliliğini de düşürür. Bu nedenle aşınmayı kontrol altına almak ve etkilerini azaltmak, triboloji alanındaki çalışmaların temel odak noktalarından biri olmuştur.



Şekil 2. Dövme kalıplarında karşılaşılan hasar türleri ve sıklıklarının dağılımı. (Sert vd., 2021).

Şekil 3'te dövme kalıplarında görülen aşınma türlerinin dağılımı sunulmaktadır. Buna göre en yaygın tür %50 oranla abrazif aşınma olup, bunu %15 ile adezif aşınma, %8 ile erozif aşınma, %8 ile titreşimli aşınma ve %5 ile korozif aşınma takip etmektedir. Kalan %14'lük kısım ise diğer aşınma türlerine aittir. Bu dağılım, kalıp ömrünü sınırlayan en kritik faktörün abrazif aşınma olduğunu açıkça göstermektedir (Sert vd., 2021; Terčelj vd., 2006). Malzemelerin aşınma davranışı pek çok etkene bağlıdır. Sertlik, yüzey pürüzlülüğü, kristal yapı, elastisite modülü, deformasyon kabiliyeti, boyut, ortam sıcaklığı, nem, atmosfer koşulları, yağlayıcı varlığı, uygulanan yük, basınç, temas hızı ve kayma mesafesi bu faktörlerin başlıcalarıdır (Kumar vd., 2022a; Zhai vd., 2021a).

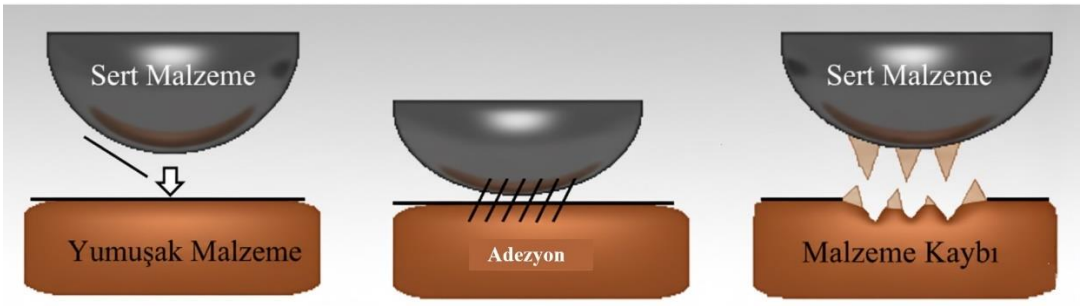


Şekil 3. Dövme kalıplarında aşınma türleri ve oranları (Chander & Chawla, 2017).

1.3. Aşınma Mekanizmaları

1.3.1. Adezif Aşınması

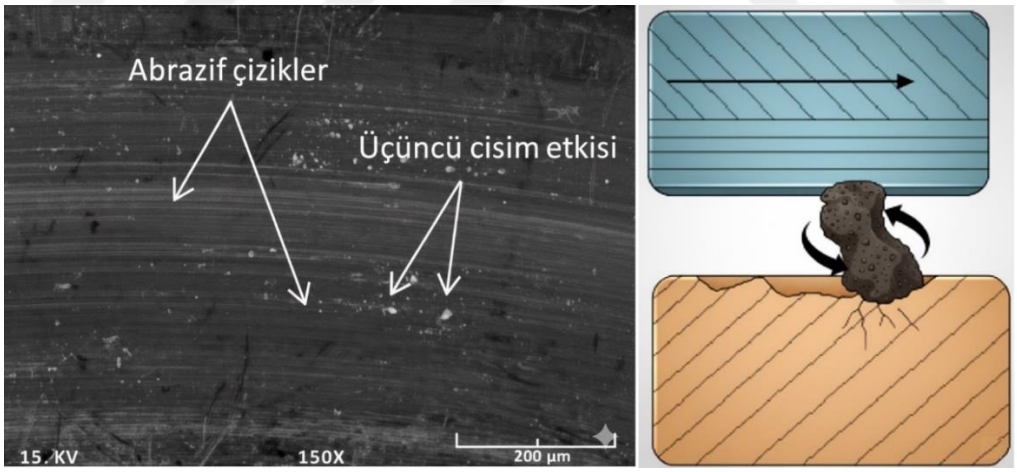
Adezif aşınma, temas halindeki metal yüzeyler arasında meydana gelen lokal malzeme transferi veya kaybı ile karakterize edilen bir aşınma türüdür. Yüzeylerin temas noktalarında oluşan yüksek basınç ve sürtünme etkisi, mikro bölgelerde malzemelerin birbirine yapışmasına neden olur. Bu bölgelerde oluşan mikro kaynaklar, kayma hareketi sırasında parçalanarak yüzeyden malzeme kopmasına yol açar. Şekil 4'te görüldüğü üzere, tekrarlayan hareketlerin etkisiyle bu mikro kaynaklar sürekli olarak kopar ve yüzeyde malzeme kaybı oluşturur. Adezif aşınmanın hızı ve karakteri; temas yüzeylerinin sertliği, pürüzlülüğü, koruyucu film tabakasının varlığı ve ortamda bulunan partiküllerin etkisiyle doğrudan ilişkilidir.



Şekil 4. Adezif aşınmanın oluşum mekanizmasının şematik gösterimi

1.3.2. Abrazif Aşınması

Abrazif aşınma, birbirine göre izafi hareket eden yüzeyler arasındaki sert pürüzlerin veya tanelerin, daha yumuşak malzeme yüzeyini çizerek talaş kaldırması sonucu meydana gelmektedir. Bu sert pürüzler yüzeydeki oksidasyon ürünlerinden oluşabileceği gibi, dışarıdan sisteme giren partiküllerden de kaynaklanabilir. Söz konusu parçacıklar kesici takım etkisi göstererek yumuşak malzemeden malzeme kaybına neden olur. Bu mekanizmanın şematik gösterimi Şekil 5'te sunulmaktadır.

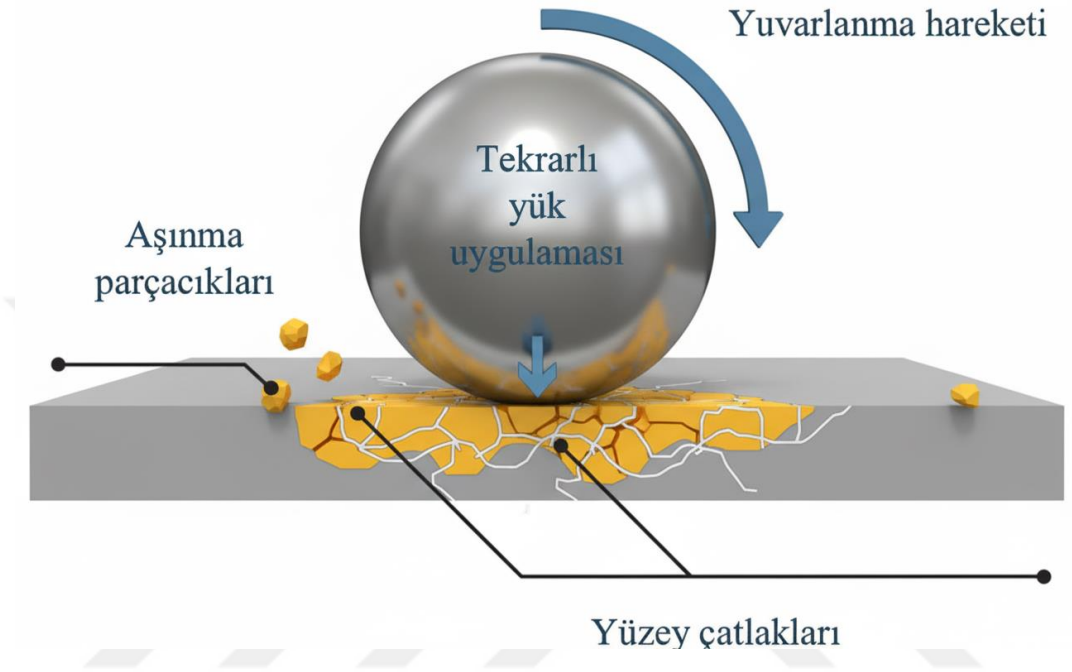


Şekil 5. Abrazif aşınma gösterimi (Azimi igdir, 2016)

1.3.3. Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, malzemenin tekrarlayan yükler ve gerilmeler altında yüzeyinde veya iç yapısında çatlaklar oluşturmasıyla meydana gelen bir mekanizmadır. Mikro çatlaklar, sürekli yinelenen gerilmelerin etkisiyle büyüyerek sonunda yüzeyden malzeme

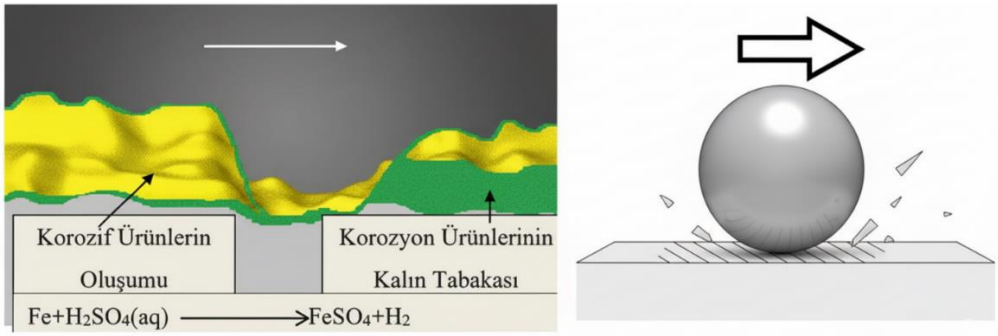
kaybına yol açar. Bu aşınma türü özellikle titreşimli ve dinamik yükler altında çalışan parçalarda yaygın olarak görülmektedir. Çatlak oluşumu ve büyüme süreci Şekil 6'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 6. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi

1.3.4. Korozif Aşınma

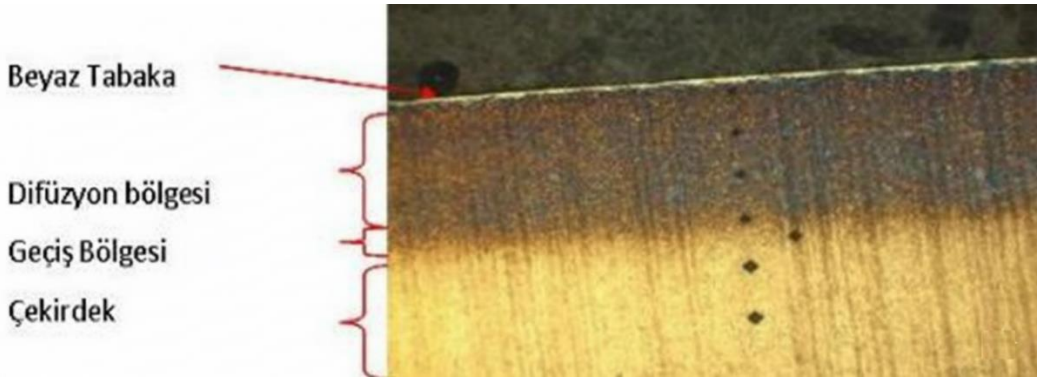
Korozif aşınma, malzeme yüzeyinde gerçekleşen kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Bu aşınmanın şiddeti; ortamın kimyasal bileşimi, sıcaklık ve nem koşulları ile yüzeydeki koruyucu film tabakasının varlığına doğrudan bağlıdır. Bu mekanizmanın şematik gösterimi Şekil 7'de sunulmaktadır.



Şekil 7. Korozif aşınma mekanizmasının şematik temsili

1.4. Dövme Kalıplarında Hasar Mekanizmalarının Kontrolü ve Önlenmesi

Dövme kalıplarında görülen aşınma ve çatlamaların önlenmesi için çeşitli yüzey işlemleri ve dayanımı artırıcı yöntemlerden yararlanılmaktadır. Yüzey mühendisliği kapsamında uygulanan sert kaplamalar, termokimyasal işlemler, ince film kaplamalar ve geçiş elementleri içeren sert tabaka kaplamalar; kalıpların aşınma direncini yükseltmekte, iş parçası ile kalıp arasındaki yapışmayı engellemekte ve sürtünme katsayısını düşürerek yüzey özelliklerini iyileştirmektedir. Böylece kalıpların kullanım ömrü belirgin şekilde uzatılmaktadır (Dennis & Mahmoud, 1987; Hawryluk vd., 2017; Kumar vd., 2022b). Dövme kalıplarında yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında nitrürleme, PVD ve CVD kaplama teknikleri ve hibrit kaplamalar (örneğin nitrürleme ile ince film kaplamanın birlikte uygulanması) yer almaktadır (Kumar vd., 2022b; Widomski & Gronostajski, 2020). Nitrürleme, dövme kalıplarının yüzey dayanımını artırmak amacıyla uygulanan bir termokimyasal işlemdir. Bu yöntemde yüzeye difüze edilen azot, alaşım elementleriyle reaksiyona girerek sert nitrür bileşikleri oluşturur. 350-590 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen işlem sonucunda yüzey sertliği artarken, malzemenin iç yapısındaki tokluk korunur. Böylece hem aşınma ve korozyona karşı yüksek direnç sağlanır hem de çatlak oluşumu geciktirilerek ilerlemesi yavaşlatılır. Şekil 8, nitrürleme işlemine ait olan görüntüyü göstermektedir.

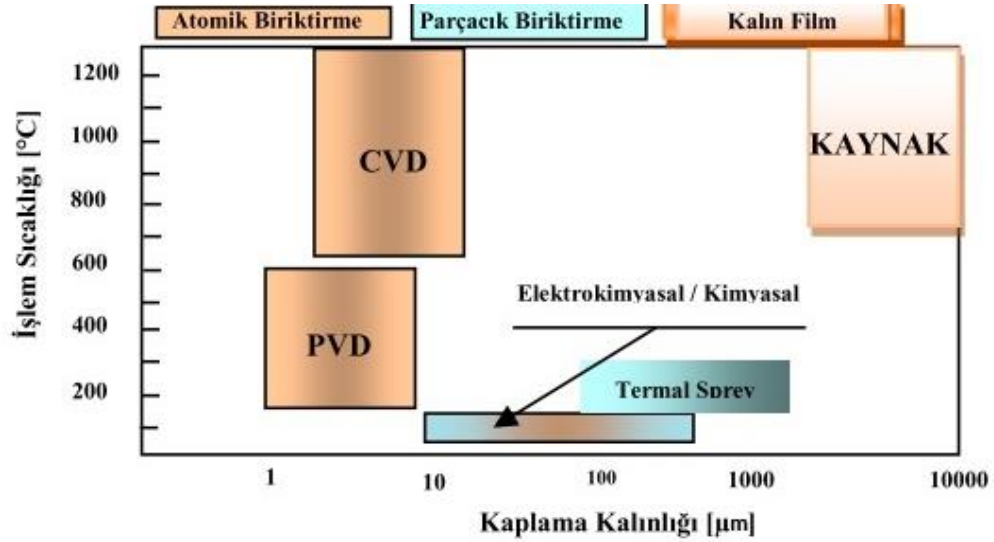


Şekil 8. Nitrasyon işlemine ait görsel (Widomski & Gronostajski, 2020)

Nitrürlenmiş yüzeylerin her koşulda yeterli performans sergilemediği yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur. Özellikle sıcak dövme uygulamalarında karşılaşılan yüksek termal döngüler, aşırı mekanik yükler ve yoğun aşındırıcı ortamlar altında nitrürlenmiş tabakanın yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir (Hawryluk, Dudkiewicz, Zwierzchowski, vd., 2024). Literatürdeki araştırmalar genel olarak, nitrürleme işleminin termal ve termomekanik yorulma gibi hasar mekanizmalarına karşı sınırlı direnç sunduğunu göstermektedir (Birol & İsler, 2011; Yilkiran vd., 2012). Bu nedenle, daha gelişmiş yüzey modifikasyon tekniklerinin araştırılması ve uygulanması gerekliliği öne çıkmaktadır (Hawryluk, Dudkiewicz, Borowski, vd., 2024). Malzemelerin yüzey özelliklerini optimize etmeye yönelik kaplama işlemleri, özellikle yüksek sıcaklık ve stres altında çalışan dövme kalıplarında kritik bir rol oynamaktadır. Bu yöntemler, aşınma, korozyon ve sürtünme direncini artırırken ana malzemenin yapısal bütünlüğünü korur. Böylece endüstriyel süreçlerde hem verimlilik artışı hem de maliyet avantajı sağlar. Bu amaçla en sık kullanılan yöntemler, vakum ortamında gerçekleştirilen Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) teknikleridir (Navinsek vd., 2001; Sert, 2022).

PVD, katı durumdaki hedef malzemenin atomik veya moleküler seviyede buharlaştırılarak taban malzeme yüzeyine biriktirilmesi esasına dayanır. İşlem düşük basınçlı plazma ortamında gerçekleşir ve dört temel aşamadan oluşmaktadır. Buhar akısının oluşturulması, buharın tabana transferi, birikme ve tabaka oluşumu (Mattox, 2010). Düşük işlem sıcaklıkları sayesinde PVD yöntemi, takım çelikleri gibi malzemelerde yapısal bozulmaya yol açmadan yüksek hassasiyetli kaplamaların elde edilmesine olanak tanır (Dobrzański vd., 2005). CVD ise yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara dayanır. Reaktif gazların taban malzeme yüzeyinde reaksiyona girerek ince ve homojen bir kaplama tabakası oluşturması bu yöntemin temel prensibidir. CVD yüksek kaliteli

kaplamalar üretme potansiyeli sunarken, işlem sıcaklıklarının yüksek olması nedeniyle bazı malzeme türleri için sınırlamalar taşımaktadır (Aytaç, 2018; Sabzi vd., 2023). Farklı kaplama yöntemlerinin çalışma sıcaklık aralıkları Şekil 9'da karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



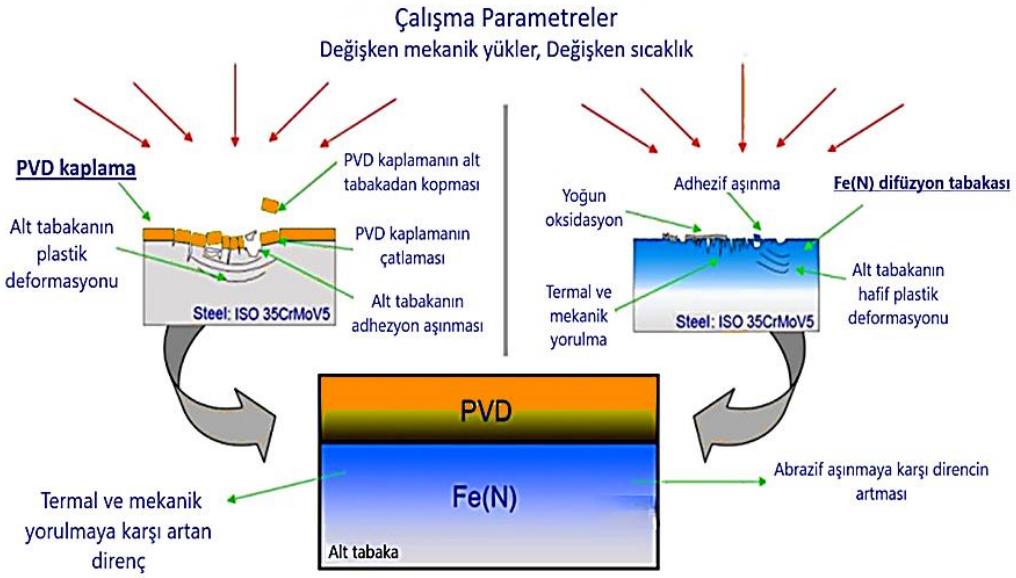
Şekil 9. İşlem sıcaklığı ve kaplama kalınlığına göre kaplama sınıflandırılması (Aytaç, 2018)

PVD kaplama yöntemi, abrazif aşınmanın etkisini sınırlayarak termo-mekanik yorulma kaynaklı hasarın ilerleme hızını azaltabilmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, takım çeliklerinin kalitesini ve kullanım ömrünü artırmak amacıyla farklı yüzey mühendisliği tekniklerinin birleştirilmesi, yani hibrit kaplama yöntemlerinin, en etkili çözümlerden biri olduğunu ortaya koymuştur (Hawryluk vd., 2024). Özellikle ısıl işlem yöntemleri ile PVD'nin bir arada kullanılması dikkat çekici avantajlar sunmaktadır. En yaygın hibrit uygulamalardan biri, nitrürleme ve PVD'nin birlikte uygulanmasıdır. Bu hibrit yapıda bulunan nitrür tabakası, sıcaklık değişimleri ve mekanik şoklara karşı alt tabakanın sertliğini artırarak plastik deformasyona direncini göstermektedir. Ancak hibrit kaplamaların etkili olabilmesi için nitrür tabakası ile PVD kaplaması arasında uygun bir geçiş tabakasının oluşturulması kritik öneme sahiptir. Tabakalar arasındaki sertlik farkı çok yüksek olduğunda, kaplamaların ayrılması ve çatlakların gelişmesi kaçınılmaz hale gelmektedir (Birol & İsler, 2011; Yilkiran vd., 2012). Literatürde, hibrit kaplamaların sıcak dövme süreçlerinde takım ömrünü önemli ölçüde artırdığına dair pek çok bulgu yer almaktadır. Pres ve çekiçle dövme işlemlerinde kullanılan

kalıplarda hibrit PVD kaplamalarının takım dayanıklılığını belirgin biçimde artırdığı gözlemlenmiştir (Podgrajšek vd., 2015). Bazı araştırmalar, nitrojen açısından zengin bir alt tabaka üzerine uygulanan PVD kaplamanın takım çeliklerinin dayanıklılığını ortalama %40-80 oranında yükseltebildiğini, hatta bazı durumlarda bu oranın daha da yüksek olabildiğini göstermektedir. Bu nedenle hibrit kaplamaların kullanımı yalnızca yüzey mühendisliği açısından değil, aynı zamanda endüstriyel sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği bakımından da önemli bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir (Hawryluk, Dudkiewicz, Borowski, vd., 2024).

Sıcak dövme kalıpları için öne çıkan kaplamalar arasında alüminyum ve titanyum bileşiklerine dayalı tabakalar yer almaktadır. Titanyum ve alüminyum nitrür kaplamaları, yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı direnç sağlarken sertliği de artırmaktadır. Nitrürleme ile TiN, CrN, (Ti, Cr) N ve Ti (C, N) kaplamalarının uygulanmasına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Smolik vd., 2000). Hibrit kaplamaların başarısında en kritik unsur, nitrürleme işlemiyle elde edilen difüzyon tabakasıdır. Çeşitli çalışmalar, hibrit tabakaların aşınma direncinin yalnızca üstteki kaplamaya değil, aynı zamanda alt tabakanın özelliklerine de bağlı olduğunu vurgulamaktadır. Bu doğrultuda, sıcak dövme uygulamalarında kullanılan kalıp malzemelerinin nitrür tabakasıyla güçlendirilmesi ve ardından PVD kaplamayla desteklenmesi yaygın olarak incelenmektedir. Bulgular, yüzey tabakalarının uygun şekilde eşleştirilmesinin aşınma direncini artırmada kritik rol oynadığını göstermektedir (Widomski vd., 2021). PVD kaplaması ile nitrür difüzyon tabakasından oluşan hibrit yapının şematik gösterimi Şekil 10’da sunulmaktadır.



Şekil 10. PVD kaplaması ve nitrür difüzyon tabakasından oluşan hibrit kaplamanın yapısı

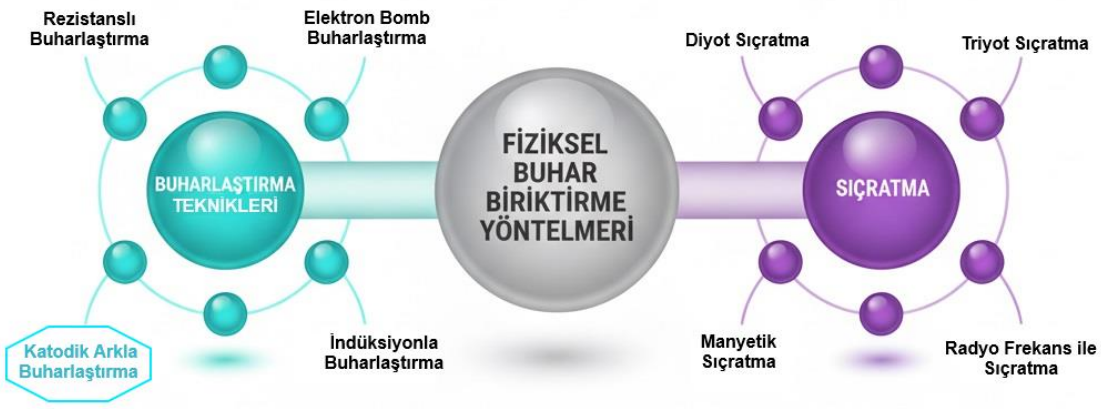
1.5. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemleri

Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD), hedef malzemeden fiziksel süreçlerle (buharlaştırma veya sıçratma) elde edilen atom ya da moleküllerin vakum ya da düşük basınçlı plazma ortamında taban malzemenin yüzeyine taşınıp burada yoğunlaşarak ince bir film oluşturduğu kaplama yöntemleri ailesidir. Bu yaklaşım, film bileşimi ve mikroyapısı üzerinde yüksek düzeyde denetim sunmaktadır. Yalnızca elementel/alaşımsal tabakalar değil, reaktif koşullarda TiN, Ti (C, N), CrN gibi bileşik filmler de üretilebilmektedir. PVD'nin vakum temelli, görece düşük altlık sıcaklıklarında uygulanabilen yapısı; kesici takımlar ve dövme kalıpları gibi tribolojik uygulamalardan optik, mikroelektronik ve dekoratif kaplamalara kadar geniş bir kullanım alanı sağlar (Bull & Berasetegui, 2006; Mattox, 2010; Yeşilyurt, 2021). Bu işlem genellikle vakum ortamında, yaklaşık 400 °C civarında uygulanır ve çok katmanlı, ince filmler oluşturulmasını sağlar (Bull ve Berasetegui, 2006). Tarihsel olarak ilk PVD uygulamaları, yaklaşık 19. yüzyılda Michael Faraday tarafından tellerin buharlaştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ancak o dönemdeki teknik sınırlılıklar nedeniyle yüksek kaliteli kaplamalar üretilememiştir (Vorobyova vd., 2023).

İstenen kaplama özelliklerine ulaşmak için PVD süreci dikkatle optimize edilmelidir. PVD'nin temel işleyişi dört adımdan oluşur: (1) buhar akısının buharlaştırma veya sıçratma ile üretilmesi, (2) gaz fazındaki türlerin taban malzeme yüzeyine taşınması, (3) yüzeyde yoğunlaşma ve birikim, (4) oluşan adacıkların birleşerek sürekli bir film haline gelmesi.

PVD'nin başlıca üstünlükleri şunlardır: çok çeşitli kaplama malzemeleri ve taban malzemeler üzerinde uygulanabilir; hedef veya iş parçası geometrisini bozmadan kaplama yapmaya olanak verir; yönteme bağlı olarak yüksek biriktirme hızlarına ulaşır; vakum koşulları sayesinde yüksek saflık sağlar ve film bileşimi ile mikroyapı üzerinde güçlü denetim sunar. Ayrıca ısıl işlem görmüş çelikler, temper kaybına yol açmadan kaplanabilir. Buna karşılık, birikim süreci genellikle taban malzemenin pürüzlülüğünü büyük ölçüde koruduğu için kaplama sonrası taşlama/parlatma ihtiyacı sınırlı kalabilir; ancak, iyi adezyon ve yüksek film kalitesi için yağ ve oksit giderimi ile gerektiğinde plazma/iyon ön-temizliği gibi yüzey hazırlığı adımları kritik önemdedir (Martin, 2010).

PVD uygulamaları, genel olarak buharlaştırma ve sıçratma olmak üzere iki ana teknikle sınıflandırılmaktadır. Şekil 11'de, fiziksel buhar biriktirme yöntemlerine ilişkin genel şematik tamıtımı sunulmaktadır.

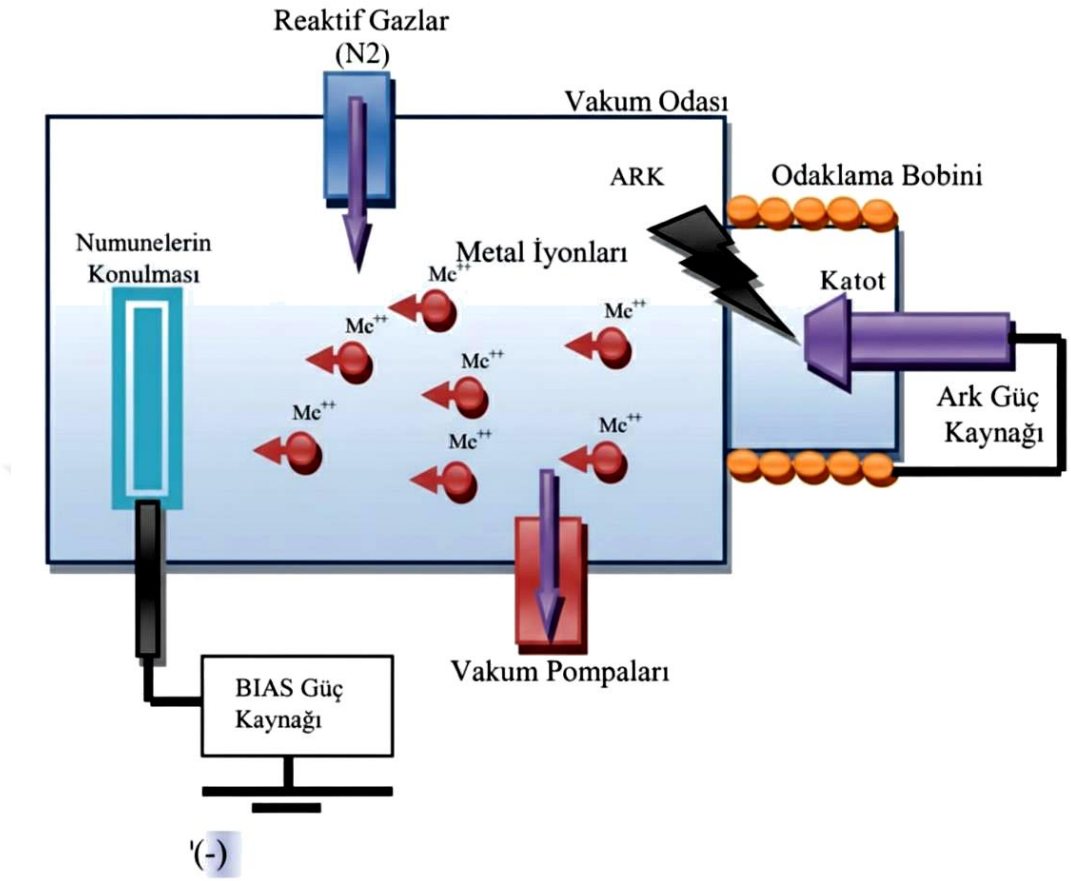


Şekil 11. Fiziksel buhar biriktirme yöntemlerine ait genel şematik görünüm

Sıçratma olgusu ilk kez 1852'de W. R. Grove tarafından doğru akım ışımalı deşarj tüplerinde gözlemlenmiştir. Bunu izleyen yıllarda difüzyon pompalarındaki ilerleme, vakum ortamının daha kararlı ve hassas denetimini sağlayarak düşük basınçta güvenilir kaplamaları mümkün kılmıştır (Greene, 2017; Kölbl, 2025; Mattox, 2003). Kaplanmasındain sonucunda PVD, metal, alaşım, seramik ve polimer gibi çok çeşitli malzemelerin taban malzeme yüzeylerine kaplanmasında etkin bir yöntem hâline gelmiştir(Vorobyova vd., 2023; Yeşilyurt, 2021). Sıçratma yöntemi, malzemelerin yüzeylerini ince filmlerle kaplamak için kullanılan güçlü bir tekniktir. Bu süreç, yüksek enerjili iyonların hedef malzemeye çarparak atomları yüzeyden koparması ve bu kopan türlerin taban malzeme üzerinde birikmesi

prensibine dayanır. En önemli avantajlarından biri, momentum transferi yoluyla buhar fazına geçiş sağladığı için yüksek ergime noktalı ve termal olarak zor malzemelerin de kaplanabilmesidir. Endüstride en yaygın sıçratma konfigürasyonları DC diyot, DC triyot, RF ve manyetron düzenekleridir. Süreç, reaktif gazlarla (ör. N_2, O_2) yürütüldüğünde reaktif sıçratma adını alır ve bileşik filmler üretilebilir. Bununla birlikte, özellikle reaktif sıçratmada hedef yüzeyinde bileşik tabaka oluşması sıçratma hızını düşürebilmektedir. Uygun güç, basınç ve gaz oranları seçilerek süreç kararlılığı ve verimi iyileştirilebilmektedir (Greene, 2017; Mattox, 2003). Buharlaştırma, malzemenin katı halden buhar hâline geçirilip taban malzeme yüzeyine biriktirilmesine dayanan temel kaplama tekniklerinden biridir. Bu yöntemde, hedef malzeme elektron bombardımanı, lazer veya benzeri ısı kaynaklarıyla kritik sıcaklığa ulaştırılır ve atomları serbest bırakarak vakum ortamında taban malzeme üzerine taşır. Bu sayede ince, homojen ve yüksek kaliteli kaplama tabakaları elde edilir (Mattox, 2003). Buharlaştırma süreci genel olarak dört temel aşamada gerçekleşir: hedef malzemenin termal veya enerji bazlı yöntemlerle buhar fazına dönüştürülmesi, ortaya çıkan atom veya moleküllerin vakum ortamında taban malzemeye taşınması, buhar fazındaki türlerin yüzeyde yoğunlaşması ve son olarak yoğunlaşan atomların yüzeyde bağlanarak kaplama tabakasını oluşturması (Mattox, 2010; Ohring, 2002). Bu yöntemde kaplama, tel, çubuk veya toz formunda olabilir ve bu malzemelerin buharlaştırılması rezistans, indüksiyon, elektron bombardımanı veya katodik ark buharlaştırma gibi farklı tekniklerle sağlanabilir. Buharlaştırma, özellikle hassas yüzey özelliklerinin korunması ve yüksek saflıkta kaplamalar elde edilmesi gereken uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca, optik ve dekoratif uygulamalardan yüksek sıcaklıkta çalışan iletken filmlere kadar çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Yüksek biriktirme hızı ve geniş uygulama yelpazesi ile katodik ark buharlaştırma, en yaygın teknikler arasında yer alır.

Katodik ark buharlaştırma tekniğinde, vakumlu bir kapalı ortamda taban malzeme anot, buharlaştırılacak hedef malzeme ise katot olarak yerleştirilir. Katot üzerine düşük voltaj (10-40 V) ve yüksek akım (30-300 A) uygulanarak ark boşalması oluşturulur. Arkın temas ettiği noktalarda sıcaklık anlık olarak yaklaşık 2500°C'ye kadar yükselir ve bu yüksek enerji yoğunluğu katot malzemesinin buharlaşmasını sağlar. Arkın oluştuğu noktalar sürekli yer değiştirerek katot yüzeyinde izler bırakır ve bu sayede malzemenin homojen biçimde buharlaşması mümkün olur (Oktay, 2007). Şekil 12'da katodik ark buharlaştırma yönteminin şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 12. Katodik ark buharlaştırma tekniğinin temel prensiplerinin şematik temsili (Aytaç, 2018)

Katodik ark buharlaştırma yönteminin en önemli sorunlarından biri, buharlaşma sırasında ortaya çıkan damlacıklara (droplet) adı verilen büyük sıvı parçacıklarıdır. Bu kaplama yönteminde erimiş katottan yayılan metal damlacıkları, yüksek enerji yoğunluklu ark plazmasının karakteristik bir sonucudur. Bu nedenle damlacık oluşumu bu yöntemde kaçınılmazdır. Damlacıkların çapı ve yoğunluğu, kaplama yüzeyinin pürüzlülüğünü doğrudan belirler. Daha büyük ve yoğun damlacıklar, yüzey topografyasında düzensizliklere neden olarak sürtünme katsayısını artırır ve aşınma mekanizmalarını hızlandırır. Buna karşın, düşük damlacık yoğunluğu daha düzgün bir yüzey ve daha iyi tribolojik performansla ilişkilidir (Mattox, 2010). Bu dezavantajı azaltmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri, yönlendirilmiş katot ark tekniğidir. Katot yüzeyine yerleştirilen kalıcı mıknatıslar veya elektromıknatıslar yardımıyla yanal manyetik alan uygulanır. Böylece iyonlaşmış parçacıklar taban malzemeye yönelirken, yüksüz damlacıkları manyetik alanın

dışında bırakılır ve yüzeye ulaşmaları engellenir. Bu sayede hem yüzeydeki pürüzlülük azalır hem de kaplama kalitesi artar (Takikawa & Tanoue, 2007; Türküz, M. C, 2006). Çukurcuklar: katodik ark buharlaştırma kaplama yöntemiyle üretilen kaplamaların yüzeyinde oluşan küçük oyuk veya boşluklardır. Bu kusurlar, kaplamanın yüzey topografyasını bozarak mekanik ve tribolojik performansı olumsuz etkiler. Çukurcukların oluşumunun başlıca nedenlerinden biri katot noktası erozyonudur; yüksek akım yoğunluğu (10^4 A/cm² üzeri) katot yüzeyinde lokal erime ve malzeme kaybına yol açarak mikro çukurcukların oluşmasına neden olur. Ayrıca damlacık kopması, erimiş metal damlacıklarının yüzeyden ayrılmasıyla bölgesel boşlukların oluşmasına yol açar. Plazma dengesizliği de arkın yüzeyde düzensiz hareket etmesine neden olarak bazı bölgelerde aşırı erozyona sebep olur. Bunun yanı sıra, yüzey kirliliği veya kusurları ark noktasının kirli ya da pürüzlü bölgelere sabitlenmesine ve lokal aşınmanın artmasına yol açabilir (Mattox, 2010). Katodik ark buharlaştırma yöntemi, farklı parametrelerin optimizasyonu ile daha kontrollü sonuçlar verebilmektedir. Kaplama kalitesini etkileyen en önemli değişkenler arasında ark akımı, kaplama süresi, katot-taban malzeme mesafesi, azot gazı basıncı ve taban malzeme bias voltajı yer almaktadır (Türküz, M. C, 2006). Bu yöntemin avantajları oldukça fazladır. Yüksek iyonizasyon oranı ve yüksek biriktirme hızı sayesinde istenilen kaplama bileşimleri elde edilebilir. Ayrıca, düşük taban malzeme sıcaklıklarında bile güçlü yapışma sağlanabilmektedir. Katodik ark buharlaştırma tekniği, karmaşık geometrilere sahip parçaların kaplanmasında da başarılı sonuçlar vermekte, homojen filmler üretilebilmektedir. Sistemin basit yapısı, güç kaynağı ihtiyacının düşük olması ve katotların uzun süre kullanılabilmesi yöntemi ekonomik açıdan da avantajlı kılar (Boynueyri, 2019; Sönmezoğlu vd., 2012).

Diğer PVD yöntemleriyle kıyaslandığında katodik ark buharlaştırma öne çıkan üstünlükleri:

- Metaller, alaşımlar ve bileşikler yüksek kaplama hızlarında biriktirilebilirler.
- Taban malzeme yüksek sıcaklıklara yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmak zorunda değildir
- İstenilen kompozisyonda alaşımlar ve bileşik filmler elde edilebilir
- Geniş parametre aralıklarında kaliteli filmler elde edilebilir.
- Karmaşık şekilli parçalar üniform şekilde kaplanabilir (Oktay, 2007).

Bu çalışmada da söz konusu nedenlerden ötürü PVD tabanlı yöntemler ele alınmış ve kaplama işlemi için katodik ark buharlaştırma yöntemi kullanılması uygun görülmüştür.

1.6. Endüstriyel Uygulamalarda İnce Film ve Sert Kaplamalardaki Gelişmeler

Son yıllarda, endüstriyel ve bilimsel alanlarda birbiriyle temas halinde olan yüzeylerin ince sert koruyucu filmlerle kaplanması üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları büyük bir ivme kazanmıştır. 20. yüzyıldan itibaren geliştirilen kaplama türleri, özellikle taban malzemeye büyük değişiklikler getirmeden yüzey özelliklerini optimize etmeyi hedeflemiştir. Bu sayede malzemelerin tribolojik performansı artırılmış, aşınma direnci yükseltilmiş ve sürtünme katsayısı düşürülmüştür (Devarajan vd., 2023; Maksakova vd., 2025; Zhai vd., 2021b). Sert kaplamaların yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması gerektiğinden, başlangıçta bu kaplamalar sadece yüksek sıcaklıklara dirençli taban malzemelerle birlikte kullanılıyordu. Ancak, daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yönteminin geliştirilmesiyle bu kısıtlama ortadan kalkmış ve koruyucu kaplamaların uygulama alanları genişlemiştir (Zhai vd., 2021b).Vakum teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde, daha yüksek adezyona sahip kaplamalar üretmek ve kaplama parametrelerini daha hassas bir şekilde kontrol etmek mümkün hale gelmiştir. Günümüzde kullanılan kaplamalar, tek tabakalı veya çok tabakalı olarak tasarlanmakta ve TiN, CrN, AlN gibi bireysel kaplamalardan CrAlN ve CrAlTiN gibi çoklu kaplamalara kadar çeşitlenmektedir. Çok tabakalı kaplamalar yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci ve iyi korozyon dayanımı gibi özellikler sunmakta, bu sayede kesme takımları, kalıplar ve endüstriyel makinelerde kullanım ömürlerini önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle geçiş metal nitrürleri, kaplamaların kovalent, metalik ve iyonik bağ yapıları sayesinde yüksek sertlik, kimyasal kararlılık ve üstün tribolojik performans sağlamaktadır. Modern teknolojilerle birlikte, optik, elektronik ve savunma sanayii gibi alanlarda da sert kaplamaların uygulama alanları genişlemektedir (J. Chen vd., 2024; Tabakov vd., 2017). Bu gelişmeler, seramik film kaplamaların endüstriyel süreçlerde etkin bir şekilde kullanılmasını ve makine elemanlarının ömürlerinin uzamasını mümkün kılmaktadır. Yapılan çalışmalarda ZrN kaplamasında aynı benzer şartlarda Kotodik ark ve Manyetik sıçratma yöntemi yapılmış. Elde edilen sonuçlara göre manyetik sıçratma yönteminde daha iyi mikro yapı ve daha yüksek mekanik özellikleri elde edilmiş ama endüstriyel amaçlı olarak katodik ark buharlaştırma daha yaygın ve daha ekonomik bir yöntem olduğu için daha çok tercih edilmekte olduğu tespit edilmiştir (Purandare vd., 2014). TiN ve CrN seramik kaplamaların ilk örnekler olarak ortaya çıktığını görüyoruz. Bilimsel çalışmalar, bu ilk nesil kaplamaların avantajları ve dezavantajları arasındaki dengeyi ortaya

koymaktadır. Özellikle, TiN'in yüksek sıcaklıklarda oksitlenme direncinin yetersiz olduğunu belirtilmiştir (Ichimura & Kawana, 1993). Kaplama teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte, sertlik, yapışma dayanımı ve özellikle yüksek sıcaklıkta aşınma ve oksidasyon direncini artırmak amacıyla yapıya geçiş metalleri eklenerek üçlü kaplamalar geliştirilmiştir (Spain vd., 2005). CrN temelli ikili kaplamalara Al eklenmesiyle elde edilen CrAlN kaplamaları, özellikle yüksek sıcaklıkta yüksek aşınma dayanımı ve termal kararlılık davranışı sergilemektedir (Schramm vd., 2004). Kim ve arkadaşlarının çalışmasına göre, özellikle Al içeriği yüksek olan CrAlN kaplamaların 450 °C'de yüksek aşınma direnci sergilediği belirlenmiştir (Kim ve Lee, 2006). Diğer bir çalışmada, Fox-Rabinovich ve diğer araştırmacıların çalışmalarına göre, TiAlN ve AlCrN kaplamaların yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikleri karşılaştırıldığında, AlCrN kaplamaların sıcaklıktan daha az etkilendiği ve sertliklerinin daha az değiştiği belirlenmiştir (Fox-Rabinovich vd., 2006). AlCrN kaplamaların mekanik ve termal özelliklerinde, özellikle Al içeriğinin artmasıyla iyileşmeler görüldüğü ifade edilmiştir (Willmann vd., 2006). Spain ve ekibinin kesici takımlar üzerinde yaptığı bir çalışmada, CrAlN ve TiAlN kaplamaların HSS üzerine PVD yöntemiyle biriktirilmesini ve 500°C'de yapılan laboratuvar ve mekanik testlerini içermektedir. Bu çalışma, CrAlN ve TiAlN kaplamalarının sertlik açısından daha üstün olduğunu ortaya koymuştur. CrAlN'ün özellikle aşınma direncinde daha iyi bir performans sergilediği ve Al elementinin etkisiyle elastik ve plastik deformasyonun iyileştiği belirlenmiştir (Spain vd., 2005). Başka bir çalışmada ise, CrAlN ve TiAlN kaplamaların kesici takımlar üzerindeki performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve her iki kaplamanın da farklı kesme hızlarında kesici takımların servis ömrünü önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, CrAlN kaplamaların daha küçük tane boyutuna ve daha yoğun bir mikro yapıya sahip olduğu, bu nedenle yüzey sertliğinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir (Liu vd., 2017). Kaplama teknolojilerindeki gelişmelerin bir sonucu olarak, AlCrN kaplamalara Ti eklenmesiyle oluşturulan dörtlü kaplamaların (AlCrTiN), üçlü kaplamalara göre daha yüksek oksidasyon direncine sahip olduğu tespit edilmiştir (RU vd., 2008). Literatürdeki çalışmalar, genellikle Ti-Al-Cr-N kaplama tabakasının yapısal özellikleri, termal kararlılık ve oksidasyon üzerine odaklanmıştır (Nojit vd., 2021; RU vd., 2008). Ancak, yüksek sıcaklıklardaki aşınma performanslarıyla ilgili sistemli çalışmaların eksik olduğu göz önüne alınmalıdır. Yapılan bir başka çalışmada, CrAlTiN kaplamasının termal kararlılık, oksidasyon ve tribolojik özellikleri incelenmiş ve çok katmanlı yapısının çatlak yayılımını engellediği, aşınma direncine sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, yüzeyde oluşan oksit

tabakasının kaplamanın oksit direncini artırdığı belirtilmiştir (Polcar ve Cavaleiro, 2014). Gerçekleştirilen literatür araştırmalarında, Vanadis 23 ve Dievar çelikleri üzerinde uyulanmış kaplama çalışmalarının oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Makówka ve Wendler'in çalışmalarında, alüminyum alaşımlarının dövülmesi amaçlı uygulama için Vanadis 23 çeliği üzerine karbon esaslı kaplama gerçekleştirmişlerdir. Kaplama malzemeleri olarak WC (%10 C ve %90 W) ve SiC/C (%87 C + %8 Cr ve %5 Si) kullanılmıştır. Sonuç olarak, Vanadis 23 üzerinde SiC yapışma kabiliyetinin WC'e göre daha düşük olduğu ek olarak WC'ün aşınma direncinin SiC'e göre daha yüksek olduğu ifade edilmiştir (Makówka & Wendler, 2017). Moskalewicz ve diğerlerinin çalışmasında ise Vanadis 23 üzerine TiN/Si_3N_4 kaplaması manyetik sıçratma yöntemi ile nano kompozit kaplaması olarak uygulanmıştır. Bu çalışmada, sonuç olarak sertliğin arttığı ifade edilmiştir (Moskalewicz vd., 2015). Başka bir çalışmada ise Vanadis 23 üzerine W/W_2N kaplama kullanılmıştır. Kaplama PVD manyetik sıçratma yöntemi ile yapılmış ve aşınma deneyleri pin on disk olarak oda sıcaklığında ve 800 derece sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Tribolojik özelliklerin incelenmesinden elde edilen sonuçlara göre W/W_2N kaplı vanadis 23 çeliğinde aşındırıcı yüzey olarak 100Cr6 çelik bilyeler kullanıldığında, alümina bilyelere göre daha yüksek sürtünme katsayısı değerleri gözlenmiştir. Ayrıca, Moskalewicz ve diğerleri tarafından yapılan bir diğer çalışmada, Nc-WC/a-c kaplama ile birleştiren yapılan dubleks yüzey işlemi, kuru aşınmada Ti-6Al-4V mikrosertlik ve aşınma direncini iyileştirmiştir. Upadhyay ve Kumaraswamidhas'ın çalışması da bu sonuçları desteklemiştir (Moskalewicz vd., 2010; Upadhyay & Kumaraswamidhas, 2014).

Bu çalışmada kullanılan ince film kaplama türlerinin aşağıda fiziksel özellikleri ve kullanım alanları gösterilmektedir.

1.6.1. TiN Kaplamalar

TiN kaplamalar, makine parçaları, kesme takımları ve yarı iletken teknolojisinde difüzyon bariyeri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek ergime noktası, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sertlik değerleri (2600-3100 HV) ve korozyona karşı üstün direnç, bu kaplamaların başlıca avantajlarıdır. Titanyum nitrürün kimyasal stabilitesi, asitlere karşı yüksek korozyon direnci sağlar ve kaplamanın iş parçasına yapışmasını engelleyerek yüzey ömrünü uzatır. Düşük ısıl iletkenliği sayesinde talaş kaldırma işlemleri sırasında oluşan yüksek sıcaklıklardan kesici takım malzemesini korur ve deformasyonu

önler. Ayrıca altın sarısı rengi sayesinde dekoratif amaçlarla kullanılabilir ve biyouyumlu olması, implant yüzeyleri gibi medikal uygulamalarda da tercih edilmesine olanak tanır (Pişken, 2007).

1.6.2. TiAlN Kaplamalar

TiAlN kaplamalar, yüksek sertlik gösteren TiN fazı ile sürtünme katsayısını düşüren yumuşak AlN fazının kombinasyonu sayesinde üstün tribolojik performans sunmaktadır (Ramadoss vd., 2013). Kaplamanın özellikleri, özellikle alüminyum oranına bağlı olarak değişir; Ti/Al oranına göre kaplama rengi siyahtan bronza doğru farklılık göstermektedir.

1.6.3. TiCN Kaplamalar

TiCN kaplamalar, karbon içeren reaktif gazlar kullanılarak üretilir. Karbon oranının artması, kaplamaların sertliğini TiN kaplamalarına kıyasla yükseltirken, sürtünme katsayısını düşürür. Bununla birlikte, TiN kaplamaları her uygulama için uygun olmayabilir; TiCN kaplamalar, yalnızca yüksek sertlik ve tokluk gerektiren frezeler, raybalar, matkaplar, zımbalar, kesme kalıpları ve bazı dövme kalıpları için tercih edilmektedir. Cheng ve arkadaşlarının çalışmasında, yüzeyi nitrürlenmiş AISI H13 çeliğine TiCN kaplanması sonucunda yüzey mikrosertliğinde ve aşınma ömründe belirgin bir artış gözlenmiştir (Cheng vd., 2011).

1.6.4. TiSiN Kaplamalar

TiSiN kaplamalar, yüksek sertlikleri ve üstün termal ile oksidasyon dayanımları sayesinde yüksek hızlı ve verimli makine uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Movassagh-Alanagh vd., 2017). Silisyumun kaplamaya eklenmesi, TiN tanelerinin nano boyutlu olarak amorf a-SiNx matrisine gömülmesini sağlayan nanokompozit bir yapı oluşturur. Bu sayede kaplamalar hem yüksek sertlik hem de düşük sürtünme katsayısı sunar. PVD yöntemi ile üretilen TiSiN ve AlTiN/TiSiN kaplamaların tribolojik performansı, oda sıcaklığı ile 250°C ve 500°C'de, 2 ve 5 N yükler altında incelenmiştir. Sonuçlar, TiSiN içeren kaplamaların sıcaklık arttıkça aşınma direncini koruduğunu göstermiştir (Altaş vd., 2019). Diğer bir çalışmada, çiftli katodik ark plazma buharlaştırma yöntemi ile WC-Co altlık

numuneler üzerine TiSi (80:20 at. %) ve TiAl (50:50 at. %) içeren TiSiN/TiAlN filmleri kaplanmış ve mekanik ile tribolojik özellikler değerlendirilmiştir. TiSiN/TiAlN kaplamalarının sertliği 32-38 GPa arasında ölçülürken, TiAlN kaplamaların sertliği 29 GPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca, TiSiN'in sürtünme katsayısı 0.56, TiAlN'in ise 0,6 olarak bulunmuştur. Araştırmacılar, kaplamaların kalınlığı ve yapısının mikroyapı, mekanik, aşınma ve korozyon özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu vurgulamıştır (C.-L. Chang vd., 2007).

1.6.5. TiAlCrN Kaplamalar

TiAlCrN kaplamaların, taban malzemenin aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı bilimsel çalışmalarla rapor edilmiştir. Bu artış, kaplama yüzeyinde oluşan alüminyum ve krom bileşiklerinden kaynaklanan oksit tabakasına bağlanmaktadır. TiN kaplamasına eklenen Al ve Cr elementleri, kaplamanın yüksek sıcaklıklarda korozyon direnci ve kimyasal kararlılığını artırarak, TiN kaplamalara kıyasla çok daha üstün performans sağlar (Akbal, 2014). TiAlCrN kaplamalar farklı sıcaklık aralıklarında çeşitli aşınma mekanizmaları sergilemekte ve Cr elementinin kafes yapısına katkısı sayesinde sertlik artışı ile sürtünme düşük seviyelerde tutulmaktadır. Ayrıca bu kaplamaların yüksek sıcaklıklarda oda sıcaklığına kıyasla daha iyi tribolojik performans sergilediği, yani artan sıcaklıkla birlikte oksit tabakasının oluşumunun sürtünmeyi daha da stabilize ettiği görülmüştür (Zuo vd., 2021).

1.6.6. Çalışma Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma, dövme kalıplarında karşılaşılan aşınma kaynaklı verim kayıplarını azaltmak ve kalıp hizmet ömrünü artırmak amacıyla Dievar ve Vanadis 23 çeliklerinin yüzey özelliklerini geliştirmeyi hedeflemektedir. Sanayide yaygın kullanılan erişilebilir kalıp çeliklerinin sınırlı ömür sunması, buna karşılık Dievar ve Vanadis 23 gibi yüksek performanslı çeliklerin yüksek ilk yatırım maliyeti gerektirmesi, bu iki malzemede yüzey mühendisliği çözümlerinin ekonomik açıdan önemini artırmaktadır. Bu nedenle, söz konusu taban malzemeler hem işlemsiz hem de nitrürlenmiş durumda değerlendirilmiş ve her iki yüzeye TiN esaslı, Al, Cr, C ve Si katkılı kaplamalar katodik ark buharlaştırma PVD yöntemiyle uygulanmıştır. Kaplamalar, maliyet-performans dengesi gözetilerek seçilmiştir.

TiN, yaygın kullanımı, düşük maliyeti ve taban malzemeyle kurduğu güçlü bağ sayesinde referans kaplama olarak ele alınmıştır. TiAlN, Al katkısının sağladığı oksidasyon kararlılığı ve sertlik stabilitesi ile yük altında tabaka bütünlüğünü desteklemekte; TiAlCrN, Cr içeriğiyle oksit film davranışını iyileştirmektedir. TiCN, karbon katkısı sayesinde sürtünmeyi düşürerek adezif aşınmayı sınırlandırmakta; TiSiN ise Si katkısı sayesinde nanokompozit karaktere yaklaşarak yüksek sertlik ve daha düzgün bir yüzey morfolojisi sunmaktadır. Bu çeşitlilik, farklı yük, sıcaklık ve temas koşullarında optimum yanıt verebilmek adına tercih edilmiştir. Nitrürleme işlemi, taban malzemede azotça zengin bir difüzyon tabakası oluşturarak yüzey sertliğini artırmakta ve kaplama-taban malzeme arasındaki mekanik uyumu iyileştirmektedir. Böylece adezyon kuvvetlenmekte, çatlak başlatma gecikmekte ve erken soyulma riski azalmaktadır. Bu nedenle hibrit yaklaşımın (nitrür + kaplama), özellikle darbe, kayma ve termomekanik yükler altında tekil çözümlere göre daha dayanıklı bir performans sunduğu değerlendirilmektedir. Kaplamalar, yüksek biriktirme hızı, kısa işlem süresi ve endüstriyel erişilebilirliği nedeniyle katodik ark buharlaştırma PVD yöntemiyle uygulanmıştır. Orta düzey taban malzeme sıcaklıklarında çalışabilmesi, yöntemin üretim kapasitesini artırmasına ve ekonomik avantaj sağlamasına katkı sunmaktadır. Bu çalışma, dört taban malzeme durumunda (işlemsiz ve nitrürlü) uygulanan beş farklı kaplamayı değerlendirerek toplam yirmi yüzey senaryosunu karşılaştırmaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında, ilk olarak Vanadis 23 ve Dievar çelik numuneleri hazırlanmış, ısıl işlem ve gaz nitrürleme uygulanmış, ardından yüzeyler zımparalama ve parlatma işlemleriyle kaplamaya uygun hale getirilmiştir. Daha sonra katodik ark buharlaştırma yöntemiyle kaplamalar üretilmiştir.

Kaplamaların mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemek amacıyla nanosertlik ve çizik testleri yapılmış, Bilye-Disk ve Darbeli-Kayma aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşınma sonrası yüzey morfolojileri optik profilometre ve SEM analizleriyle değerlendirilmiştir. Bu bölümde numunelerin hazırlanması, kaplama işlemleri ve uygulanan test yöntemleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.

2.1. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada deneysel incelemelerde kullanılmak üzere yeni nesil çelikler olan Vanadis 23 ve Dievar sıcak iş takım çelikleri seçilmiştir. Bu çeliklerin kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Vanadis23 ve Dievar çeliğinin kimyasal bileşimi % ağırlık

Elementler	Si	C	Mo	Cr	V	W	Mn	Fe
Vanadis 23	----	1,28	5	4,2	3,1	6,4	----	Kalan
Dievar	0,2	0,35	2,3	5	0,6	----	0,5	Kalan

Deneysel çalışmalarda kullanılan Vanadis 23 ve Dievar çelik numuneleri, endüstriyel uygulamalardaki kullanım koşullarını sağlayacak şekilde ısıl işleme tabi tutulmuştur. Vanadis 23 çeliği için uygulanan ısıl işlem adımları; önce yumuşatma tavlaması, ardından gerilme giderme tavlaması ve son olarak sertleştirme (ostenitleme) sürecinden oluşmaktadır. Yumuşatma tavlamasında numuneler 850-900 °C sıcaklık aralığında fırına yerleştirilmiş, 10 °C/saat soğuma hızında 700 °C'ye kadar indirilmiş ve burada bekletildikten sonra hava ortamında soğutulmuştur. Bunu takiben, gerilme giderme amacıyla 600-700 °C sıcaklık aralığında 2 saat tutulmuş, ardından 500 °C'ye kadar fırında yavaşça soğutulmuş ve sonrasında hava ortamında oda sıcaklığına indirilmiştir. Son aşamada, iç gerilmelerin

önlenmesi amacıyla ön ısıtma uygulanmış ve numuneler 1050-1180 °C sıcaklık aralığında ostenitleme işlemine tabi tutulmuştur.

Dievar çeliği için uygulanan ısıl işlem adımları da benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, numuneler 850 °C sıcaklığa çıkarılmış ve 10 °C/saat hızla 600 °C'ye kadar soğutulmuş, ardından hava ortamında soğutma tamamlanmıştır. Daha sonra, gerilme giderme amacıyla 650 °C'de 2 saat bekletilmiş, 500 °C'ye kadar fırında yavaşça soğutulmuş ve hava ortamında oda sıcaklığına indirilmiştir. Son aşamada ise ön ısıtma uygulanarak numuneler 1000-1030 °C sıcaklık aralığında 30 dakika tutulmuş ve böylece sertleştirme işlemi tamamlanmıştır Isıl işlemler sonrasında, çelik yüzeylerinde oluşan oksit ve artık tabakalarının temizlenmesi amacıyla yüzeyler zımparalanmış ve daha homojen bir yapı elde edilmiştir. Bu işlemlerin ardından numuneler, hassas ölçülerde hazırlanabilmesi için EDM (elektro erozyon yöntemi) kullanılarak kesilmiştir. EDM kesme işlemi sonucunda numuneler 4 mm kalınlığında ve 24 ve 26 mm çapında yuvarlak diskler şeklinde elde edilmiştir.

Kesilen numuneler, yüzey hazırlığı için sırasıyla 150, 240, 400, 600, 800, 1000, 1500 ve 2000 numaralı SiC zımparalar kullanılarak zımparalanmıştır. Bu aşamada, yüzeydeki makro ve mikro düzensizlikler giderilmiş ve kaplama öncesi uygun pürüzsüzlük sağlanmıştır. Son aşamada ise numuneler, 0,3 μm Al_2O_3 süspansiyonu ile parlatılarak kaplama işlemlerine hazır hale getirilmiştir.

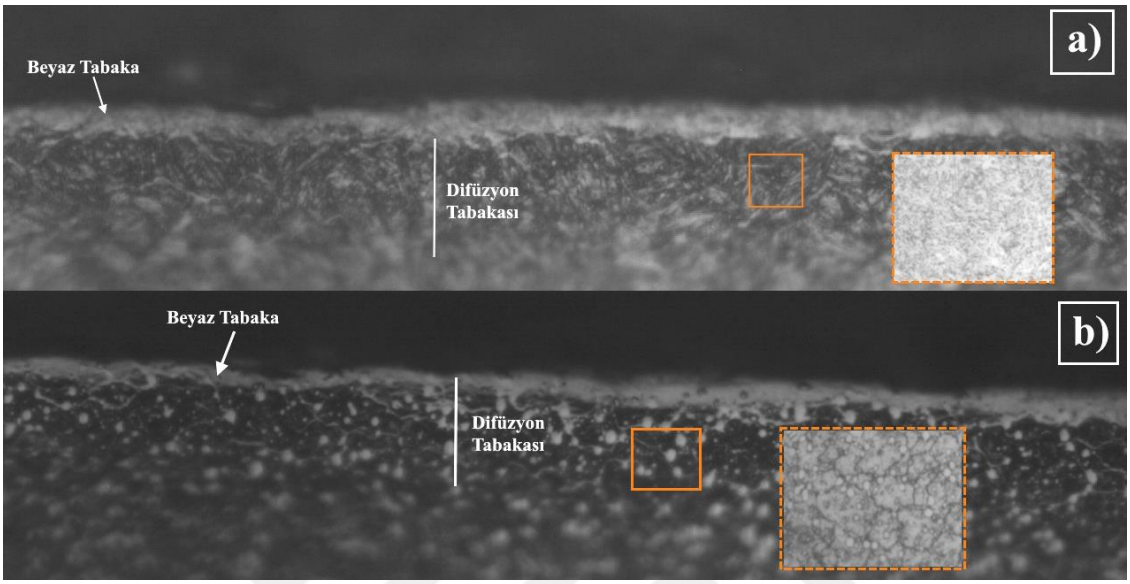
2.2. Nitrürleme İşlemi

Numune yüzeylerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla gaz nitrürleme işlemleri uygulanmıştır. Bu kapsamda, çelik numuneler 525 °C sıcaklıkta, 8 saat gaz nitrürleme işlemine tabi tutulmuştur. Belirtilen koşullar altında, yüzeylerde difüzyon yoluyla azot atomlarının çeliğe nüfuz etmesi sağlanmış ve böylece yüzeyde sert ve aşınmaya dirençli bir tabaka oluşmuştur.

Nitrürleme işlemi sonucunda, yüzeyde ε ($Fe_{2–3}N$) ve γ′ (Fe_4N) fazlarından oluşan, farklı kafes yapıları içeren bir tabaka meydana gelmiştir. Literatürde "beyaz tabaka" olarak adlandırılan bu yapı, yüksek sertliği ve aşınma direncine katkısı nedeniyle kaplama öncesinde yüzey hazırlığında kritik bir rol oynamaktadır.

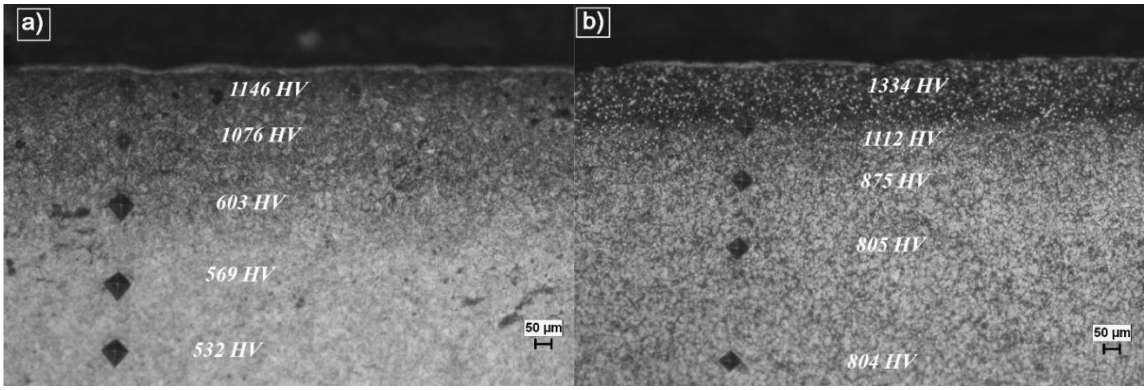
Şekil 13'te Dievar ve Vanadis 23 çeliklerinin kesit görüntüleri verilmiştir. Görsellerde, beyaz tabaka ile difüzyon tabakası arasındaki sınırların belirgin şekilde gözlemlendiği ve

tabakaların kalınlıklarında malzeme türüne bağlı farklılıkların ortaya çıktığı görülmektedir. Bu yapısal farklılıklar, nitrürleme işleminin çeliklerin mikro yapısı üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.



Şekil 13. Nitrürlenmiş kalıp çeliklerinin kesit görüntüleri a) Dievar b) Vanadis 23

Nitrürleme işleminin yüzey sertliği üzerindeki etkisi mikrosertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Şekil 14'te, nitrürlenmiş Dievar (a) ve Vanadis 23 (b) çeliklerine ait kesitlerde elde edilen sertlik izleri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, yüzeyden tabana doğru ilerleyen mikrosertlik ölçümleri sertlik değerini ortaya koymakta ve beyaz tabaka ile difüzyon tabakasının mekanik özellikler üzerindeki etkisini net bir şekilde yansıtmaktadır.



Şekil 14. Nitrürlenmiş malzemelerin alınan sertlik değerinin görüntüsü. a) Dievar, b) Vanadis 23

Yapılan Vickers mikrosertlik ölçümleri Vanadis 23 için sırasıyla 1334, 1112, 875, 827 ve 805 HV; Dievar için ise 1146, 1076, 603, 569 ve 532 HV değerlerini vermiştir. Bu sonuçlar, nitrürleme işlemi sonrasında Vanadis 23 çeliğinin yüzeyde daha yüksek ve derinlik boyunca daha dengeli bir sertlik profili sergilediğini, Dievar çeliğinde ise sertlik değerlerinin yüzeyden itibaren daha hızlı bir düşüş gösterdiğini ortaya koymaktadır.

2.3. Kaplama İşlemi ve Parametreleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan kaplamalar, katodik ark buharlaştırma yöntemiyle üretilmiştir. Kaplama işlemleri, endüstriyel uygulamalara uyarlanmış Platit π411 Plus (İsviçre) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sanayi odaklı olduğundan dolayı, kaplama parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmamış, endüstride yaygın ve güncel olarak kullanılan değerler tercih edilmiştir. Böylece çalışma daha uygulamalı bir nitelik kazanmıştır. Kaplamalara ait katodik ark buharlaştırma (PVD) işlem parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kaplamalara ait katodik ark buharlaştırma (PVD) işlem parametreleri

Kaplamalar	**Katot Akımı (A)**	**Bias Voltajı (V)**	**Sıcaklık (°C)**	**Gaz ve Akışı (Sccm)**	**Kaplama Gaz Basıncı (Mbar)**
TiN	180	150	420	250-N	6×10^{-3}
TiSiN	150	65	450	480-N	$3{,}2\times10^{-2}$
TiCN	150	100	460	N+ Asetilen	$2\text{-}6\times10^{-3}$
TiAlN	150	65	450	480Ar + N_2	4×10^{-2}
TiAlCrN	150	65	450	400-N	$2{,}5\times10^{-2}$

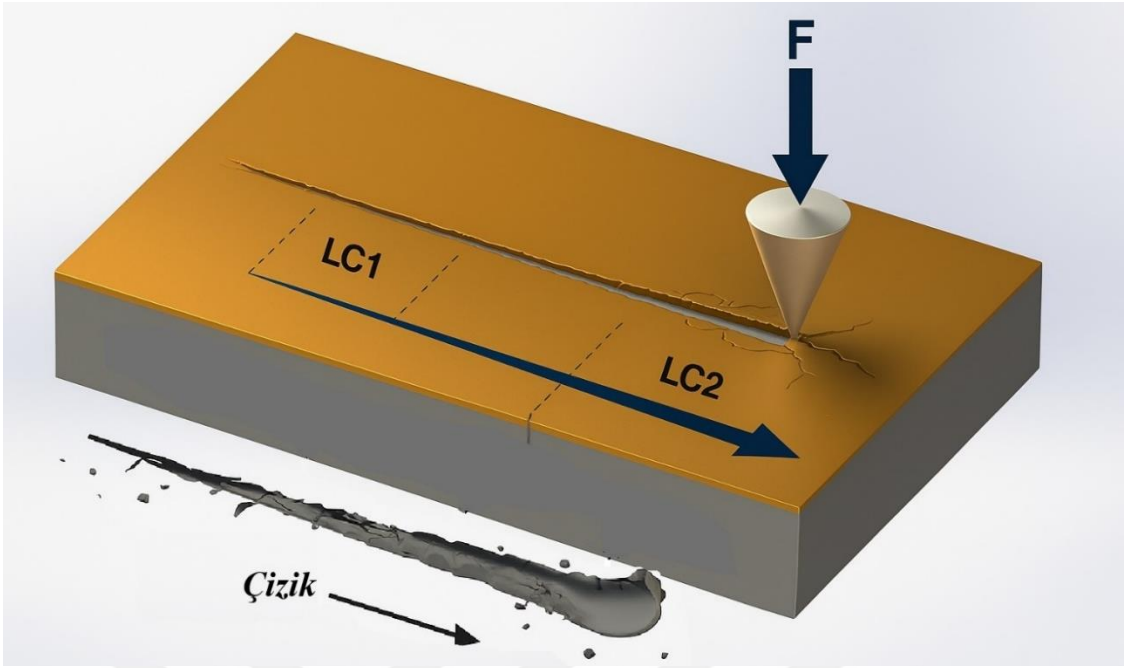
2.4. Yapısal İncelemeler

Kaplamaların mikro yapı özellikleri, yüzey morfolojileri ve kaplama kalınlıkları ise Zeiss EVO LS 10 ve Thermo Scientific Apreo 2S marka taramalı elektron mikroskopları (SEM) kullanılarak incelenmiştir. SEM analizleri sayesinde kaplamaların yüzey homojenliği, büyüme morfolojisi ve kusur oluşumları (örneğin damlacıklar veya çukurcuklar) detaylı olarak gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra, kaplama tabakalarının kimyasal bileşimleri Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) yöntemiyle belirlenmiş ve elementel dağılım haritaları çıkarılarak kaplamaların kimyasal homojenliği doğrulanmıştır.

Kaplamaların faz yapılarının incelenmesi amacıyla X-ışını difraksiyon (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, dalga boyu λ = 1,5405 Å olan CuKα radyasyon kaynağı kullanılmış ve ölçümler Bragg-Brentano geometrisine sahip Panalytical marka X'Pert3 model XRD cihazı ile yapılmıştır. Tüm numuneler, 2θ = 5-100° tarama aralığında, 0,05° tarama adım ve 3°/dk tarama hız parametreleri altında taranmıştır.

2.5. Çizik Deney İncelemeleri

Kaplama filmlerin yüzey adezyon davranışlarını incelemek amacıyla çizik testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde aşındırıcı uç olarak Rockwell C tipi elmas uç kullanılmış, yük dakikada 100 N'a kadar kademeli olarak artırılmış ve çizik işlemi 10 mm/dk hızında uygulanmıştır. Deneyler, BRUKER marka UMT-2 model mekanik test cihazı ile yapılmıştır. Çizik testleri sırasında kaplamaların adezyon performansı, çizik izi boyunca meydana gelen mikroçatlaklar, soyulma davranışları üzerinden değerlendirilmiştir. Özellikle çizik testinde tanımlanan kritik yük değerleri (Lc_1, Lc_2) kaplama-taban malzeme arayüzündeki adezyonun göstergesi olarak dikkate alınmıştır. Lc_1, kaplamada ilk mikroçatlakların görüldüğü yük seviyesini; Lc_2, kaplamada kısmi soyulma veya delaminasyonun başladığı yük seviyesini temsil etmektedir. Şekil 15'te, gerçekleştirilen scratch deneyinden elde edilen tipik çizik izi şematik olarak gösterilmekte ve kritik yük seviyelerinin oluşum noktaları işaretlenmektedir.

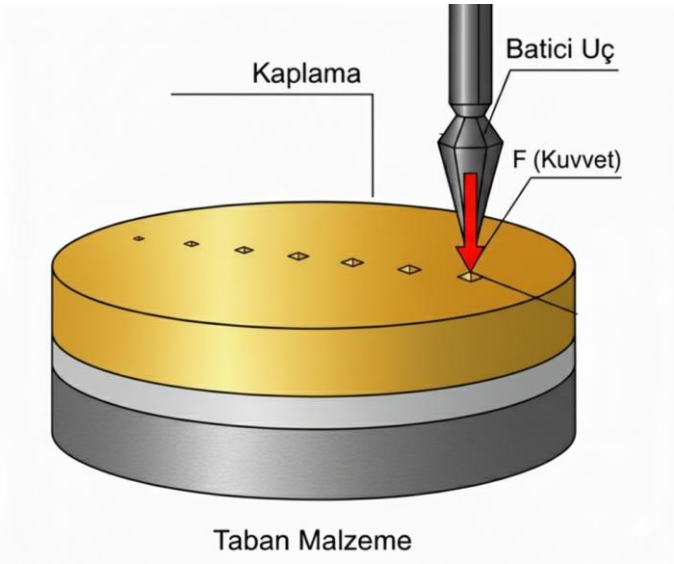


Şekil 15. Kaplamaların çizik testine ait şematik görünüm

2.6. Nanosertlik İncelemeleri

Kaplama filmlerin mekanik performanslarının değerlendirilmesinde sertlik en önemli parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu amaçla, numunelerin nanosertlik ölçümleri, Berkovich uca sahip bir nanoindentasyon cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sırasında her bir numuneye 1 mN yük, 10 saniye süreyle uygulanmış ve bu koşullar altında nano boyutta kalıcı izler oluşturulmuştur. Deneysel çalışma kapsamında, her bir numune için beş ayrı ölçüm alınmış ve elde edilen değerlerin ortalaması nanosertlik sonuçları olarak değerlendirilmiştir.

Testler sırasında kaydedilen izin derinliği, elastik geri tepme davranışı ve temas alanı parametreleri, filmlerin sertlik özelliklerini belirleyen temel kriterler olmuştur. Özellikle izin derinliği ve temas alanının hesaplanmasında Berkovich ucun sahip olduğu üçgen piramidal geometri önemli bir avantaj sağlamış, böylece nanosertlik değerleri yüksek doğrulukla belirlenebilmiştir. Şekil 16'da nanosertlik deney testinin şematiği göstermektedir.

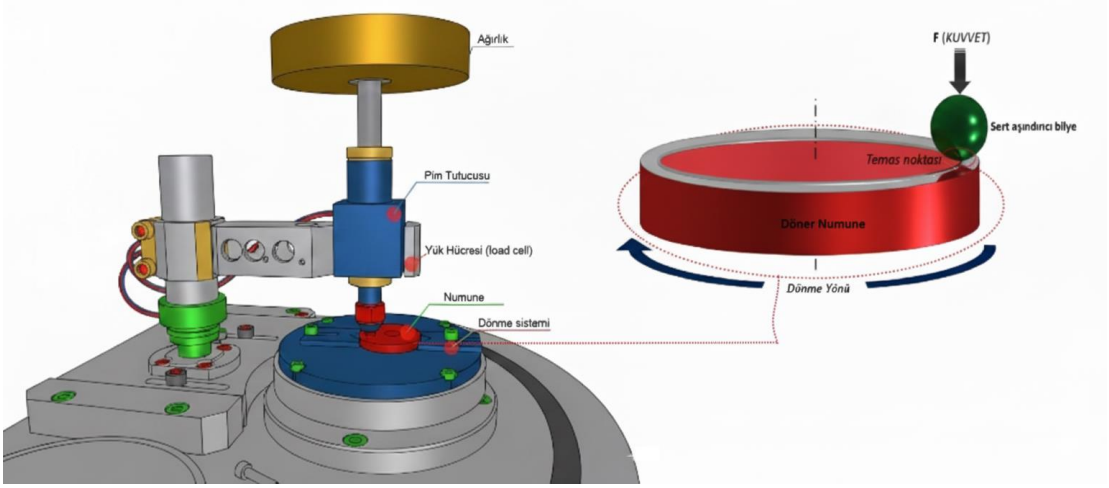


Şekil 16. Nanosertlik ölçüm yöntemine ait şematik görünüm

2.7. Bilye-Disk Aşınma Testleri

Kaplama filmlerin tribolojik özelliklerini belirlemek amacıyla bilye disk aşınma testleri uygulanmıştır. Deneylerde karşı malzeme olarak aşındırıcı aşınma koşullarını benzetim yapmak üzere 6 mm çapında Al_2O_3 bilyalar kullanılmıştır. Testler, oda koşullarında çalışan DUCOM marka TR-201 (Hindistan) tribometre cihazında gerçekleştirilmiş olup, deney parametreleri 10 N yük, 150 rpm dönme hızı, 8 mm aşınma iz çapı ve 5000 çevrim olarak belirlenmiştir. Şekil 17'de aşınma testlerinde kullanılan tribometrenin şematik görüntüsü verilmektedir. Bu koşullar altında, Vanadis 23 ve Dievar altlıkları üzerine kaplanmış kaplamalar tribolojik açıdan değerlendirilmiştir.

Aşınma testlerinin tamamlanmasının ardından, numunelerin yüzey topografyaları NANOFOCUS µscan Custom (Almanya) temassız optik profilometre ile incelenmiştir. Ölçümler 5 µm ×5 µm çözünürlükte gerçekleştirilmiş ve elde edilen profil verilerinden numunelerin aşınma hacimleri hesaplanmıştır. Bu sayede, farklı kaplamaların aşınma davranışları karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Bunlara ek olarak, aşınma izleri SEM ile incelenerek aşınma mekanizmaları karakterize edilmiştir.

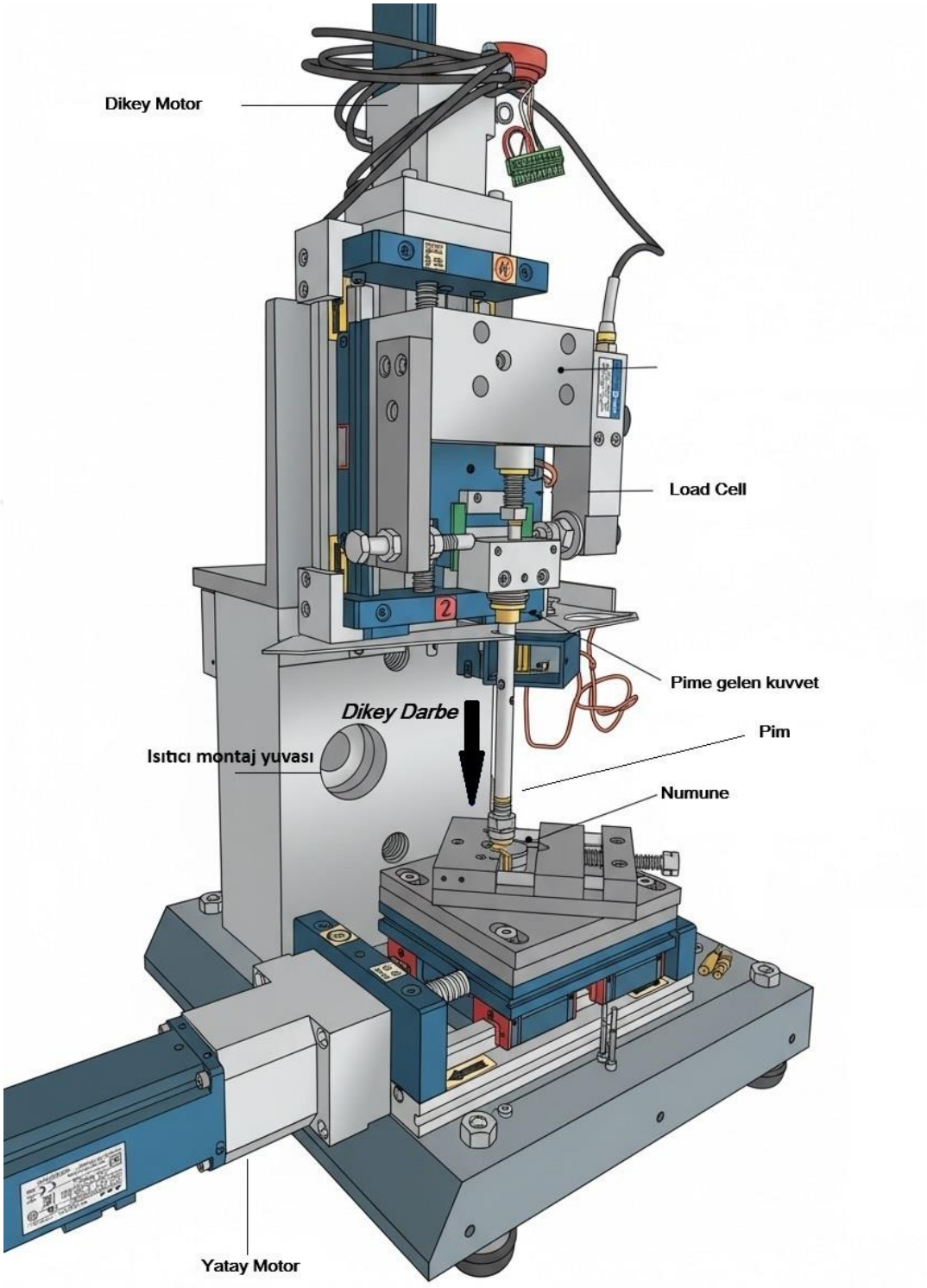


Şekil 17. Deneylerde kullanılan tribometreye ait fotoğraf

2.8. Darbeli-Kayma Testleri

Dövme işleminde kullanılan kalıpların çalışma sistematiğini bilye disk esaslı tribometreden daha uygun şekilde yansıtması amacıyla çelik numuneler özgün tasarıma sahip darbeli kayma aşınma testine tabi tutulmuştur. Bu sayede, işlem sırasında kalıpların maruz kaldığı darbe ve kayma etkisi simüle edilebilmiştir. Deneyler, oda koşullarında ve karşıt yüzey olarak 10 mm çapında Al_2O_3 bilya kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde sabit 10 N yük uygulanmış, her biri 5000 çevrimden oluşan deneyler yürütülmüştür. Her çevrimde, bilya ile numune yüzeyi arasında 5 mm kayma mesafesi sağlanmıştır. Şekil 18, Darbeli-kayma aşınma test düzeneğinin şematik görünümünü göstermektedir.

Bu deneysel düzenek sayesinde, kaplamaların darbe ile başlayan ve ardından kayma ile devam eden karma aşınma koşullarındaki davranışları incelenmiş, farklı kaplama türlerinin yüzey dayanımları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



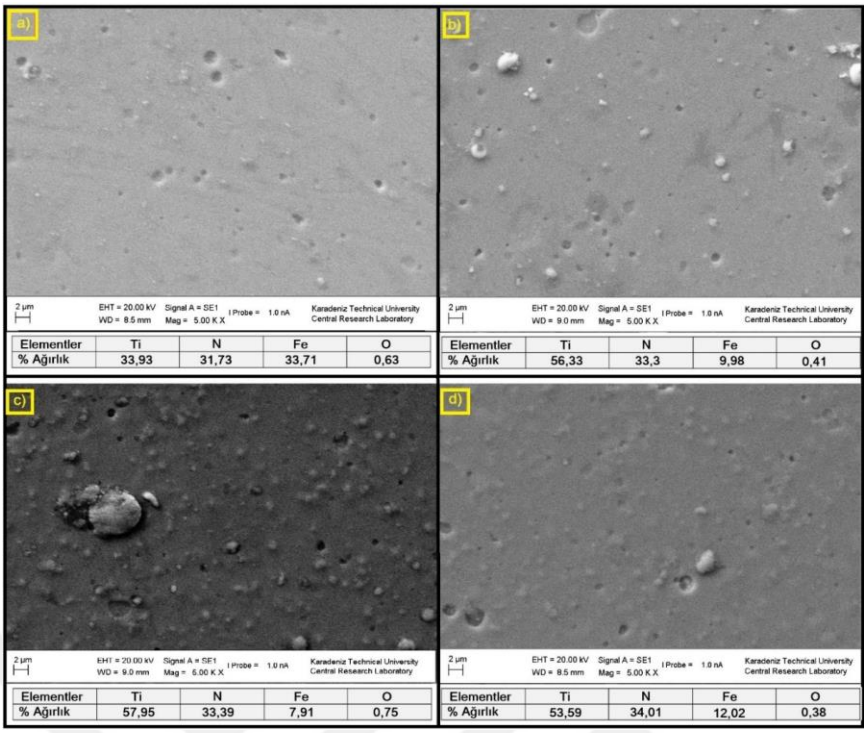
Şekil 18. Darbeli-kayma aşınma test düzeneğinin şematik görünümü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

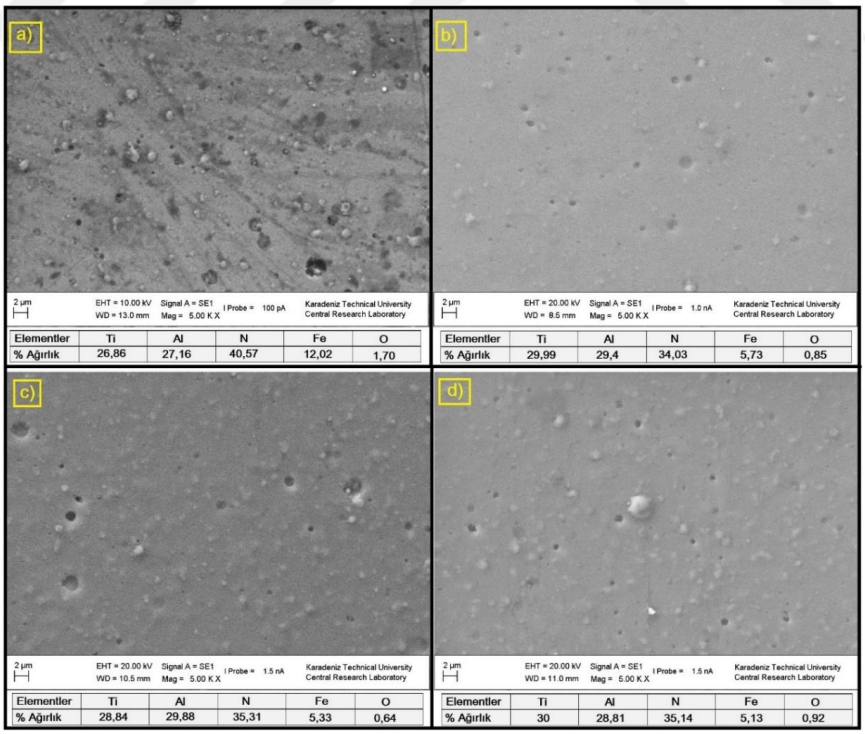
3.1. Kaplamaların Yüzey Özellikleri ve Kesit Morfolojilerinin İncelenmesi

Bu çalışmada incelenen beş farklı kaplama türü (TiN, TiAlN, TiCN, TiSiN ve TiAlCrN), dört farklı taban malzeme (Dievar, nitrürlenmiş Dievar, Vanadis 23 ve nitrürlenmiş Vanadis 23) üzerinde üretilmiş ve kesit morfolojileri ile kaplama kalınlıkları detaylı olarak değerlendirilmiştir. SEM kesit görüntüleri ve ölçümler, kaplama türü, taban malzeme ve nitrürleme işleminin, tabaka yapısı ve kalınlığı üzerinde belirleyici rol oynadığını ortaya koymuştur.

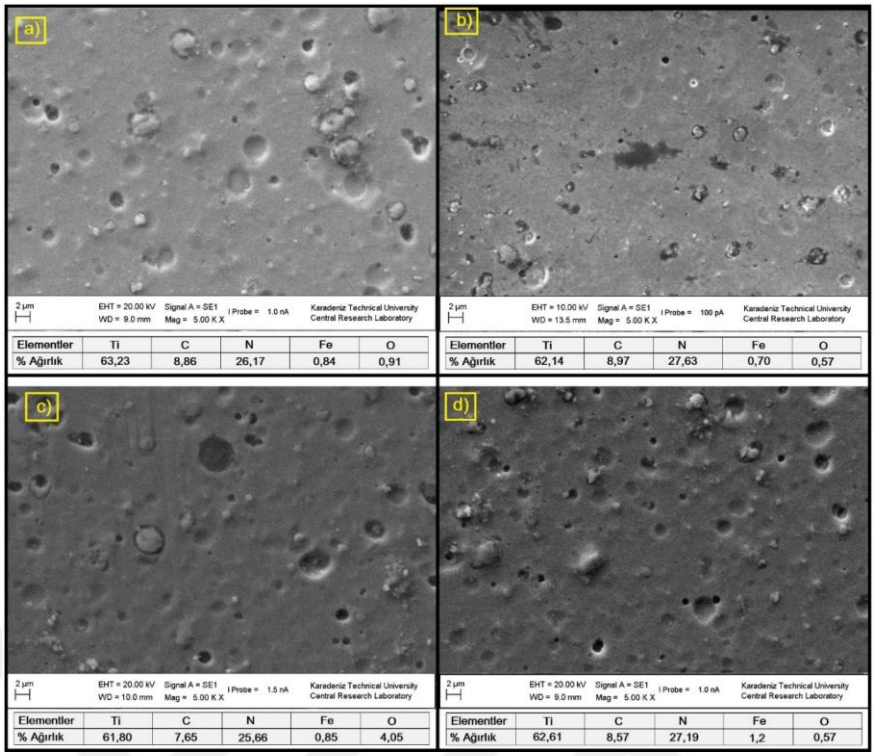
İşlemsiz ve nitrürlenmiş çeliklerin yüzeylerine uygulanmış TiN, TiCN, TiAlN, TiAlCrN ve TiSiN kaplamaları, Şekil 19 ile Şekil 23 arasında sunulan SEM görüntülerinde gösterilmektedir. Bu fotoğraflardan görüldüğü üzere, yüzey kaplamalarının oldukça düzgün ancak karakteristik çukurlar içermekte olduğu görülmektedir. Numunelerin kaplanmasında kullanılan katodik ark buharlaştırma yönteminde damlacık oluşumunun, kaplama parametrelerine bağlı olarak farklı büyüklüklerde, kaçınılmaz şekilde oluşacağı bilinen bir gerçektir (Panjan vd., 2020). Söz konusu bu damlacıklar yüksek enerji yoğunluklu plazma sürecinin doğal bir sonucudur. Damlacıkların çapı ve yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğünü doğrudan belirlemektedir. Buna ek olarak, çukurcuk olarak adlandırılan gözenek benzeri boşluklar da katodik ark buharlaştırma yöntemiyle üretilen kaplamaların yüzeyinde oluşmakta ve küçük oyuklar şeklinde görülmektedir. Damlacıklar ve çukurcuklar gibi yüzey düzensizlikleri, yüzey topografyasında yerel bozulmalara neden olarak kaplamanın mekanik ve tribolojik performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu SEM görüntülerinde, PVD yöntemiyle üretilen kaplamalara ve özellikle katodik ark buharlaştırma tekniğine özgü olarak bu tür yapısal oluşumlar açık biçimde gözlenmektedir (Panjan vd., 2020; Tkadletz vd., 2014).



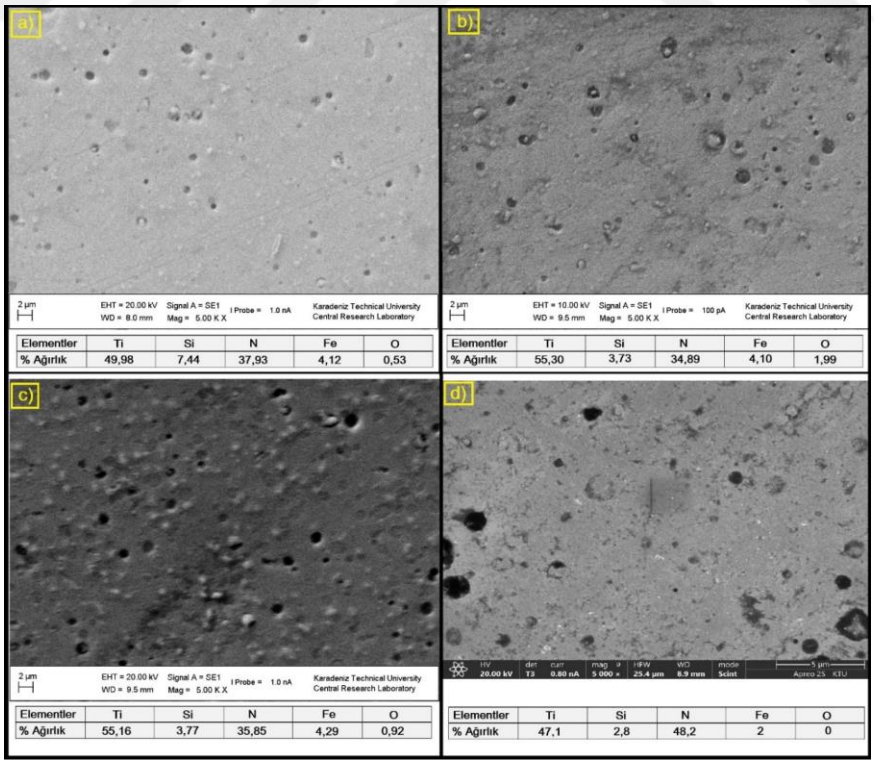
Şekil 19. TiN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar, b) Dievar Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü



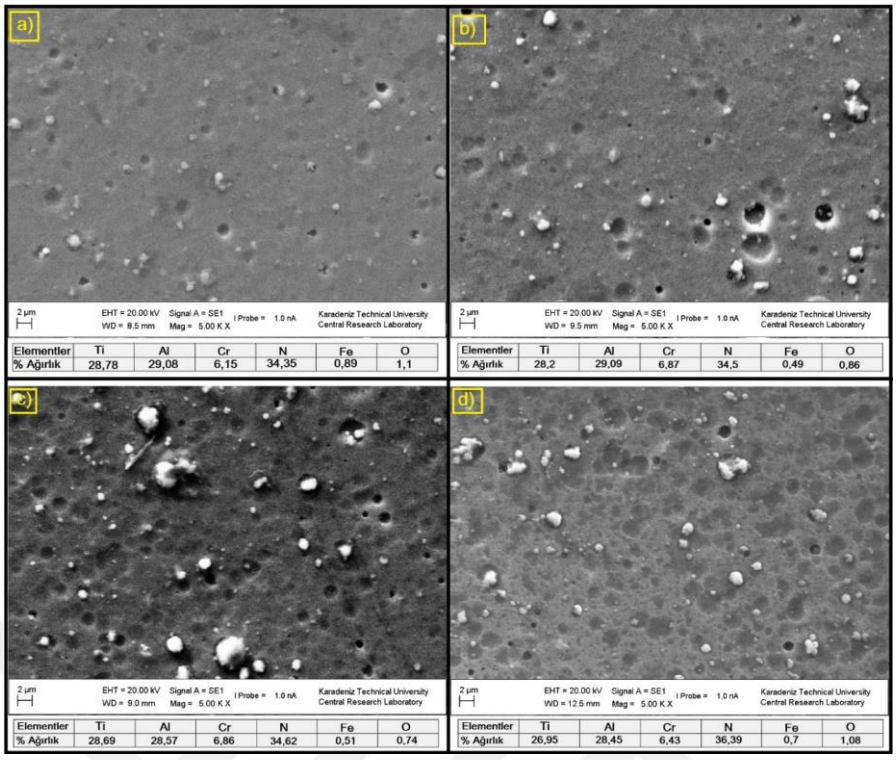
Şekil 20. TiAlN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar, b) Dievar Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü



Şekil 21. TiCN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar, b) Dievar Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü.



Şekil 22. TiSiN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar, b) Dievar nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü



Şekil 23. TiAlCrN kaplamalarının yüzey SEM görüntüleri ve EDS analizi a) Dievar, b) Dievar nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü

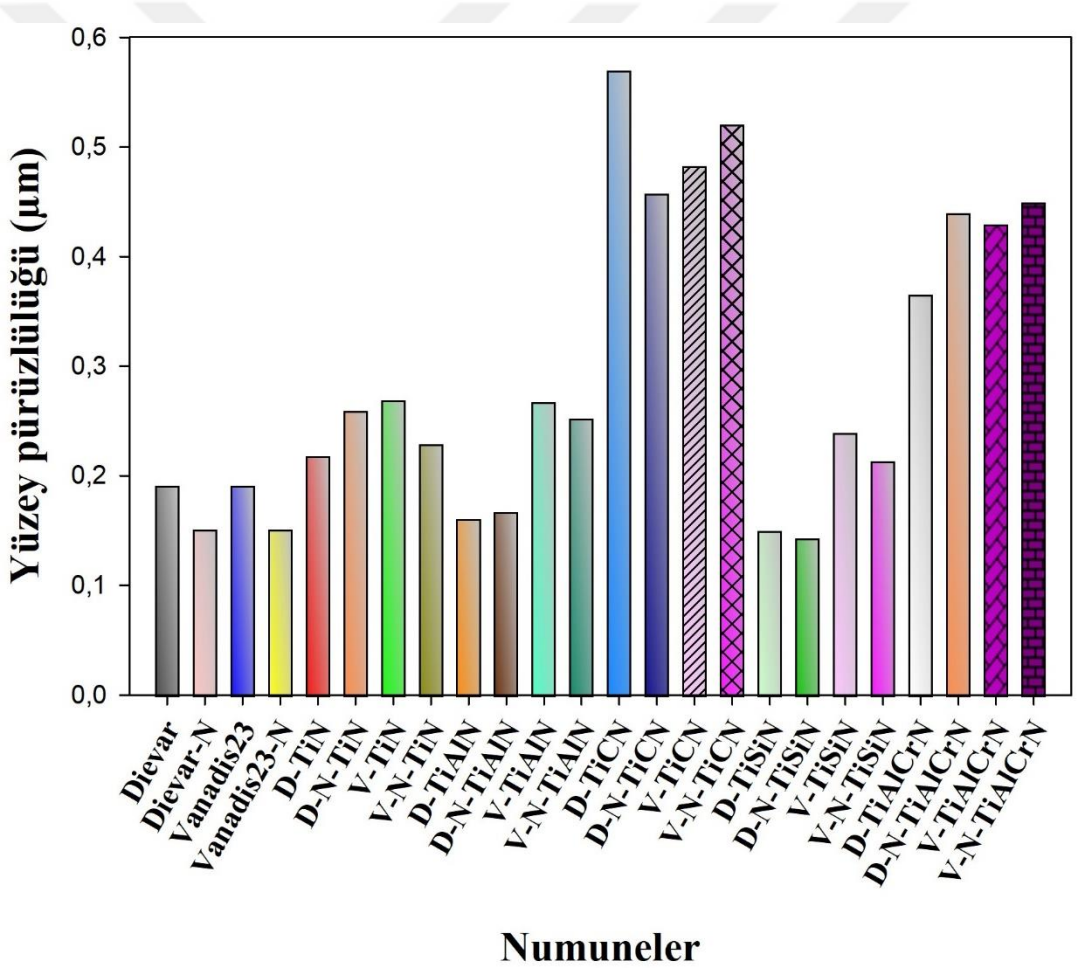
Şekil 19'dan görüldüğü gibi, TiN kaplamalar, literatürde de belirtilmiş olduğu gibi, tüm taban malzemelerde nispeten sıkı bir yapı sergilemiş, ancak PVD katodik ark buharlaştırma yöntemine özgü damlacık oluşumları gözlenmiştir (Tkadletz vd., 2014). Kaplanmış numunelerin yüzeyine uygulanan EDS analizi neticesinde, TiN kaplamalarında Fe oranı başka kaplamalara göre daha yüksek çıkmaktadır, bunda kaplama kalınlığının daha az olduğu ve taban malzemenin etkisi olarak düşünülmektedir. Ti ve N elementler en fazla orana sahiptır. Dievar numunesinde damlacık ve çukurcuk yoğunluğu daha azdır. Buna karşılık, Vanadis 23 numunesinde bu oluşumlar daha fazla ve daha yoğun şekilde gözlenmektedir. Nitrürlenmiş numunelerde ise Dievar çeliğinde damlacık ve çukurcuk yoğunluğu, nitrürlenmiş Vanadis 23'e kıyasla daha belirgindir. TiAlN kaplanmış numunelerde gözlenen damcacıklar ve çukurlar Dievar tabanlı numunelerde daha fazla görünülmesine rağmen, çukurların boyutu diğer numunelere oranla daha küçük oluşmaktadır. Vanadis 23 çeliğinin kaplamasında bu çukurların boyutu daha büyük görülmektedir. Ti, Al ve N oranlarının yüksek ve sabit olduğu görülmektedir. Bu durum, TiAlN kaplamasının başarılı bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. Al katkısı, yüzey yoğunluğunun artmasına neden olmuş, nitrürlenmiş taban malzemelerde pürüzlülük belirgin

şekilde azalmıştır (Zhecheva vd., 2006). TiCN kaplamalarinda, diğer kaplamalara kıyasla daha fazla damlacık oluşumu göstermektedir. Bias voltajı, katot akımı ve süre, damlacıklar ve çukurların oluşmasında önemli rol oynayan faktörlerden biridir. TiCN de bu faktörler başka kaplamalara göre daha fazla, ama bu oranlar TiN kaplamasına yakın oranlardır buna rağmen, TiCN da daha fazla damlacık ve çukur sergilemktedir. Karbon elementinin etkisinin yanında, damlacık sayısındaki artışın yalnızca işlem parametrelerinden kaynaklanmadığı, aynı zamanda kaplama kalınlığındaki artışla da ilişkili olabileceği düşünülmektedir (Ali vd., 2023). EDS analizinde, Ti, C ve N oranlarının dengeli olması TiCN fazının başarılı şekilde oluştuğunu göstermektedir. TiSiN kaplamalarda damlacık ve çukurcuk oluşumu, yalnızca ark stabilitesinden değil, aynı zamanda Si içeriğinden de etkilenmektedir. Yüksek Si içeriğinin, tane küçültme etkisiyle damlacık yoğunluğunu azaltarak yüzey morfolojisini iyileştirdiği sonucuna varılabilmektedir (Naghdali vd., 2025; Sert vd., 2022). EDS analizlerine göre, Dievar taban malzemesinde Si oranının daha yüksek olduğu ve buna paralel olarak yüzeyde TiCN kaplamasina göre daha az damlacık ve çukurcuk oluştuğu görülmektedir. Fe oranının düşük olması, yüzeyin iyi kaplandığını göstermektedir. TiAlCrN kaplamalarda damlacık ve çukurcuk yoğunluğu, diğer kaplamalara kıyasla orta düzeydedir. Nitrürlenmiş numunelerde ise bu oluşumların, işlemsiz taban malzemelere göre arttığı görülmektedir (Şekil 23, a ve b).

Genel olarak, tüm kaplamaların EDS analizleri, hedeflenen bileşimlere büyük ölçüde ulaşıldığını ve taban malzeme etkisinin minimumda tutulduğunu göstermektedir. Damlacık oluşumlarının boyut ve yoğunlukları kaplama elementlerine göre farklılık göstermiş, bu farklılıklar esas olarak kaplama bileşimi, kaplama parametreleri ve taban malzeme özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Damlacık ve çukurcuk oluşumu, en çok katot akımı ve bias voltajı tarafından kontrol edilir. Sıcaklık ve gaz basıncı, damlacık taşınımını ve şekillenmesini dolaylı olarak etkiler. Katot malzemesi, damlacık oluşum mekanizmasını belirleyen temel unsurlardan biridir. Kaplama süresi ise kalınlığı etkileyerek damlacıkların artış veya azalışında rol oynamaktadır. Bu nedenle, yüzey kalitesini iyileştirmek için proses parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerekmektedir (Takikawa & Tanoue, 2007).

3.1.1. Yüzey Pürüzlülüğü Analizleri

Kaplamaların yüzey özellikleri, tribolojik performansın belirlenmesinde önemli rol oynar. Pürüzlülük değerleri, kaplama türü, taban malzeme ve uygulanan nitrürleme işlemiyle doğrudan ilişkilidir. Bu bölümde, elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ayrıntılı olarak sunulmakta, kaplama-taban malzeme etkileşiminin morfolojik yapıya ve kaplama bütünlüğüne olan etkileri değerlendirilmektedir. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 24'te gösterilmektedir. Şekil 24'te verilen kısaltmaların anlamları; V (Vanadis 23 taban malzeme), V-N (Nitrürlenmiş Vanadis 23 taban malzemesi), D (Dievar taban malzemesi) ve D-N (Nitrürlenmiş Dievar taban malzemesi) şeklinde kodlandırılmıştır.



Şekil 24. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin grafiği

Şekil 24'te taban malzemeler ve beş farklı kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Taban malzeme numunelerinde nitrürleme sonrası yüzey pürüzlülüğündeki azalmanın, nitrür difüzyon tabakasının oluşumu ve işlem

sonrasında beyaz tabakanın zımparalanarak uzaklaştırılmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, gaz nitrürleme sonrasında yüzeydeki maksimum profil yüksekliğinin (Rz) azalması, yüzey profilinin daha dengeli hâle gelmesine ve ortalama pürüzlülük (Ra) değerinin düşmesine neden olmaktadır. Bu durum, yüzeydeki mikro çukur ve tepelerin kısmen dolmasıyla yüzey topografyasının daha düzgün bir hâl almasıyla açıklanabilir (Dobrocky vd., 2022). TiN- kaplamalarının incelenmesinde, ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra ≈ 0,22-0,27 (±0,05) µm aralığında ölçülmüş ve taban malzeme yüzeylerine kıyasla hafif bir artış gözlenmiştir. Bu artışın, katodik ark buharlaştırma yöntemi sırasında oluşan küçük ve orta boyutlu damlacıkların yüzeyde birikerek tepe-çukur farklarını artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitrürleme sonrasında Ra değerinin Dievar numunesinde hafif artması, Vanadis 23 numunesinde ise azalması; iki taban malzemenin mikroyapısal özellikleri, difüzyon tabakası oluşumu ve kaplama-taban malzeme ara yüzey etkileşimlerinin farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. TiAlN kaplamalarda ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra ≈ 0,16-0,26 (±0,05) µm olarak ölçülmüş ve bu değerler TiN -Dievar taban malzemesine kıyasla daha düşüktür, ancak Vanadis 23'te bu değerlerin düştüğü görülmektedir. Bu durumun, yüzey SEM görüntülerinde gözlenen damlacıkların daha büyük çapa sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitrürleme sonrası Ra'da belirgin bir artış görülmemiş, Vanadis 23'te ise hafif bir azalma olmuştur. TiCN kaplamalarda ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra ≈ 0,46-0,57 (±0,05) µm aralığında ölçülmüştür. Bu değerler, tüm kaplamalar arasında en yüksek olanlardır. Bu durum, katodik ark buharlaştırma sırasında daha fazla ve daha büyük boyutlu damlacık oluşumuna yol açmasıyla açıklanabilir. Büyük damlacıklar yüzeyde belirgin tepe-çukur farkları yaratarak Ra değerini yükseltmektedir. Nitrürleme işleminden sonra Dievar numunesinde Ra değeri düşerken (0,57 µm'den 0,45 µm'ye), Vanadis 23 numunesinde artmıştır. Bu farklılık, difüzyon tabakasının kaplama-taban malzeme etkileşimini malzeme türüne bağlı olarak değiştirmesinden kaynaklanabilir.

TiSiN kaplamalarda ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra ≈ 0.14-0.24 (±0,05) µm olup, incelenen tüm kaplamalar arasında en düşük değere sahiptir. Bu durum, Si katkısı sayesinde damlacık oluşumunun bastırılmasıyla açıklanabilir. SEM analizlerinde daha düşük damlacık yoğunluğu tespit edilmiştir. Nitrürleme sonrası Ra değerlerinde hafif bir azalma gözlenmektedir.

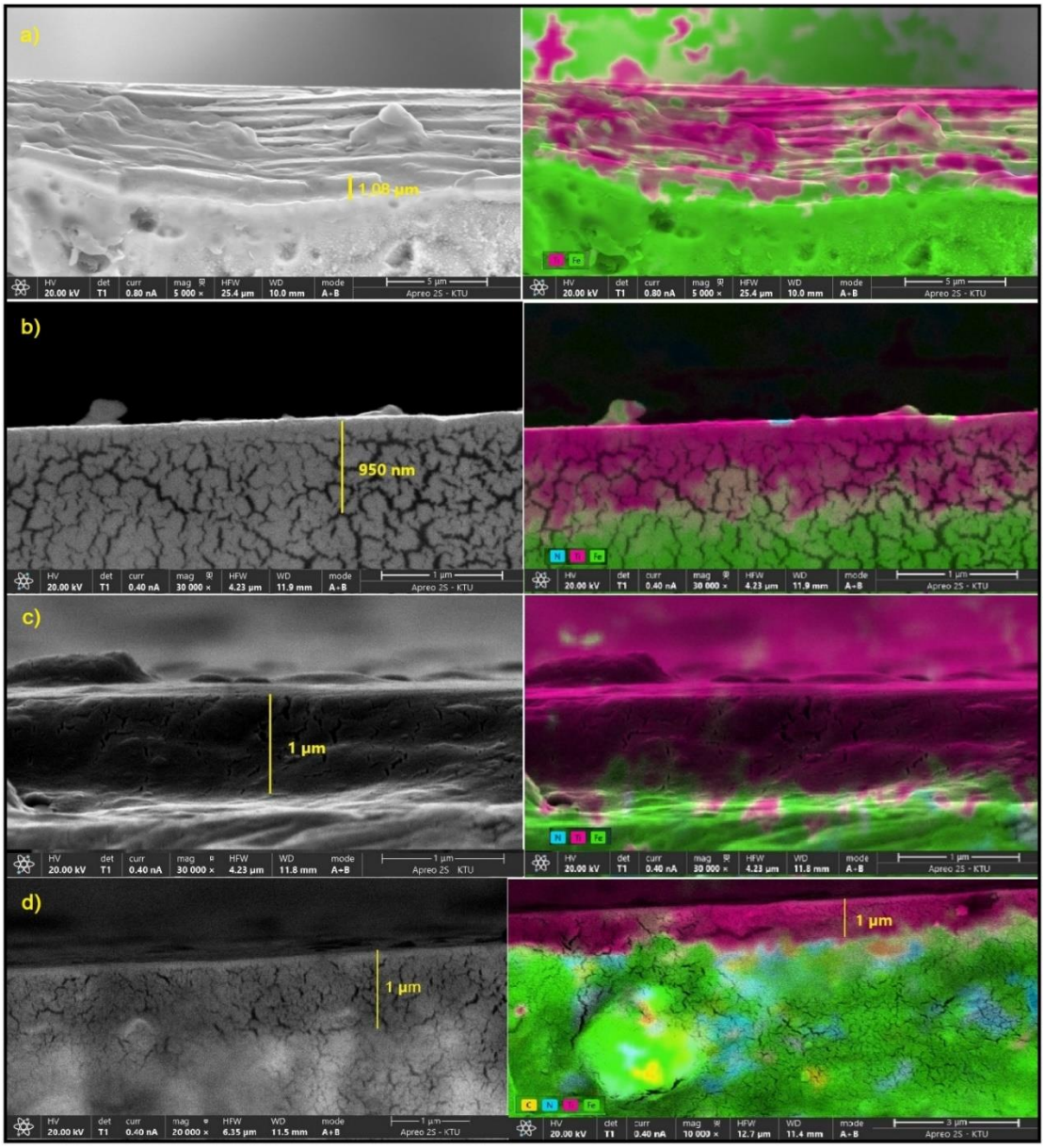
TiAlCrN kaplamalarda ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra ≈ 0.37-0.45 (±0,05) µm olup TiN, TiSiN ve TiAlN'e göre daha yüksektir. Bu artış, çok elementli katodun (Ti-Al-Cr)

etkisinden ve damlacıkların oluşumuna yol açmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. SEM gözlemleri yüksek damlacık yoğunluğunu ve belirgin çukurcuk oluşumunu doğrulamaktadır.

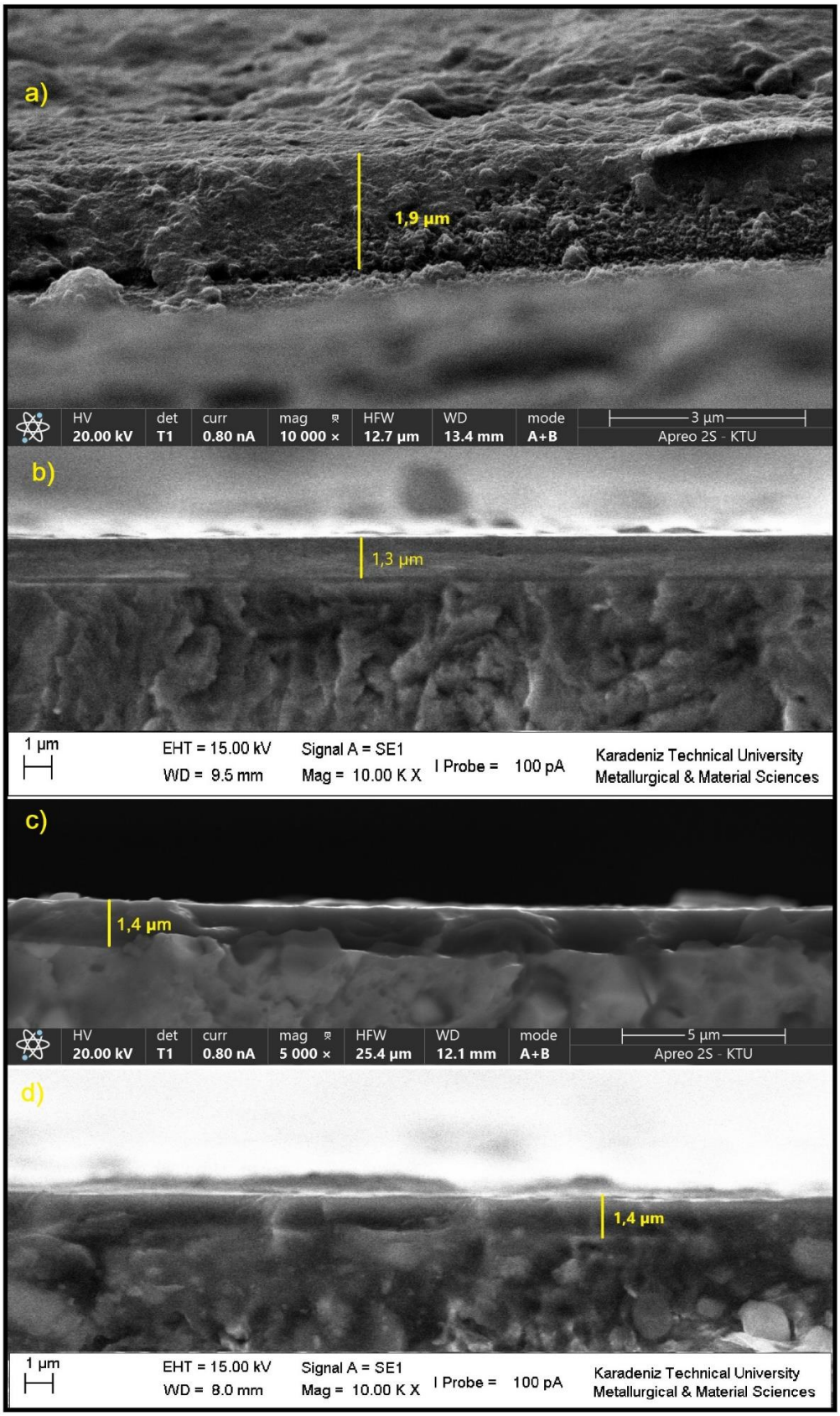
3.1.2. Kaplamaların Kesit Morfolojilerinin İncelenmesi

Bu bölümde, kaplamaların kesit morfolojileri SEM görüntüleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, kaplamalar piyasa koşulları ve yaygın olarak kullanılan kaplama yöntemleri (katodik ark buharlaştırma) dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, farklı kaplama parametreleri uygulanmış ve buna bağlı olarak kaplama tabaka kalınlıklarında farklılıklar elde edilmiştir.

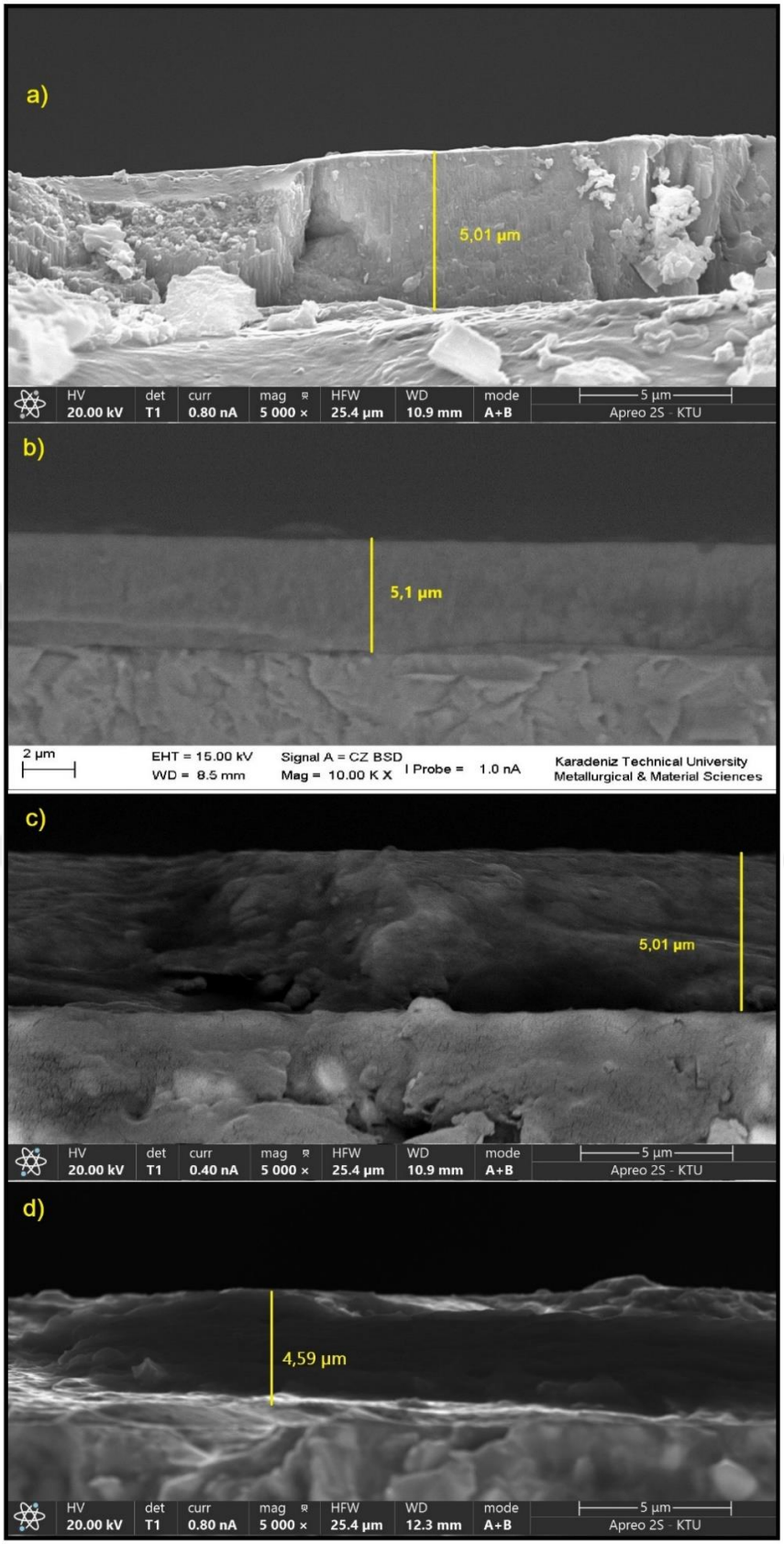
Kaplama kalınlıkları Şekil 25-29 arasında sunulmuş olup, farklı kaplama türlerine ait bulgular karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır. Ayrıca Şekil 30'da tüm kaplamalara ait olan kaplama kalınlıkları gösterilmektedir.



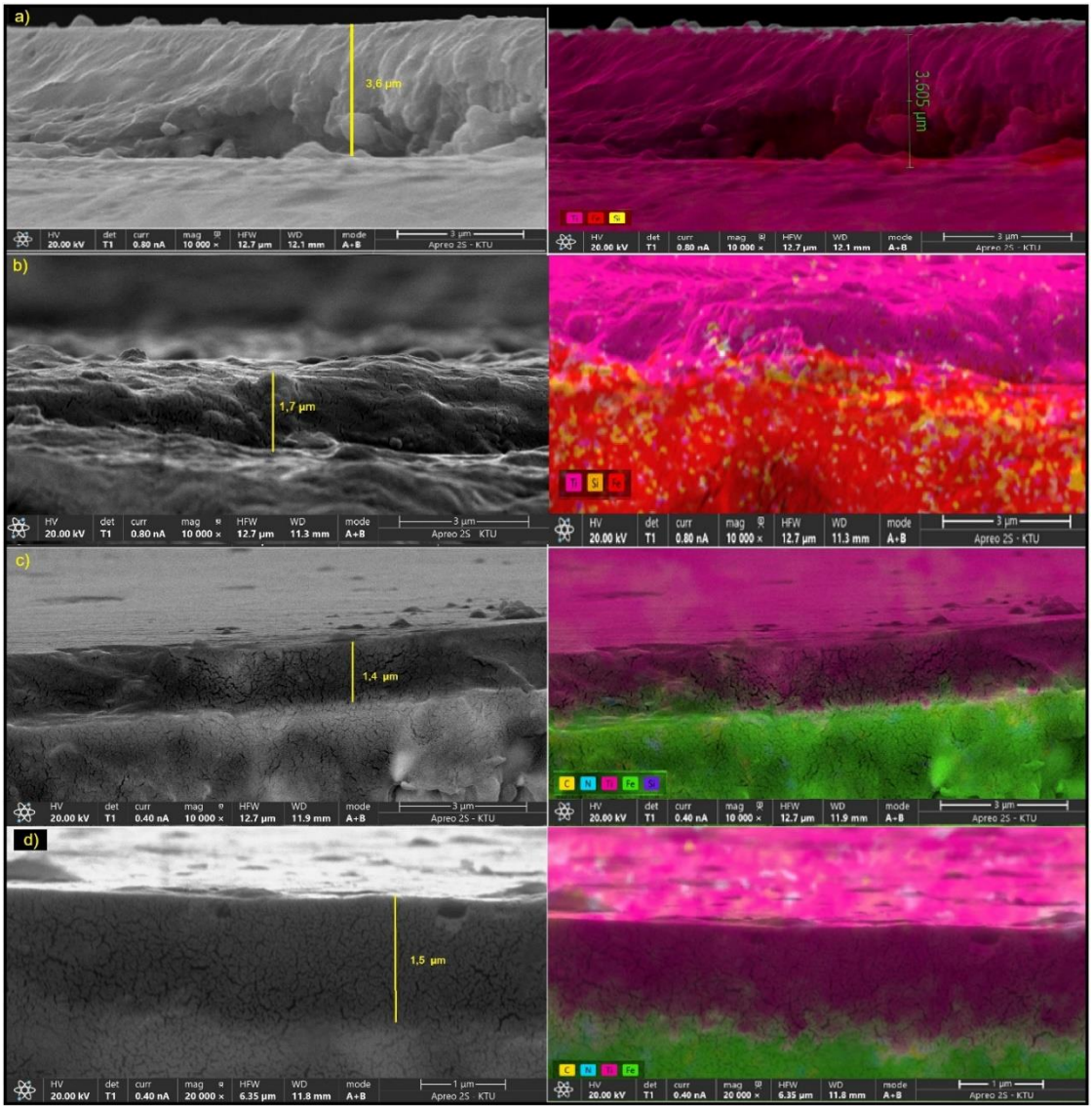
Şekil 25. TiN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar-Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü.



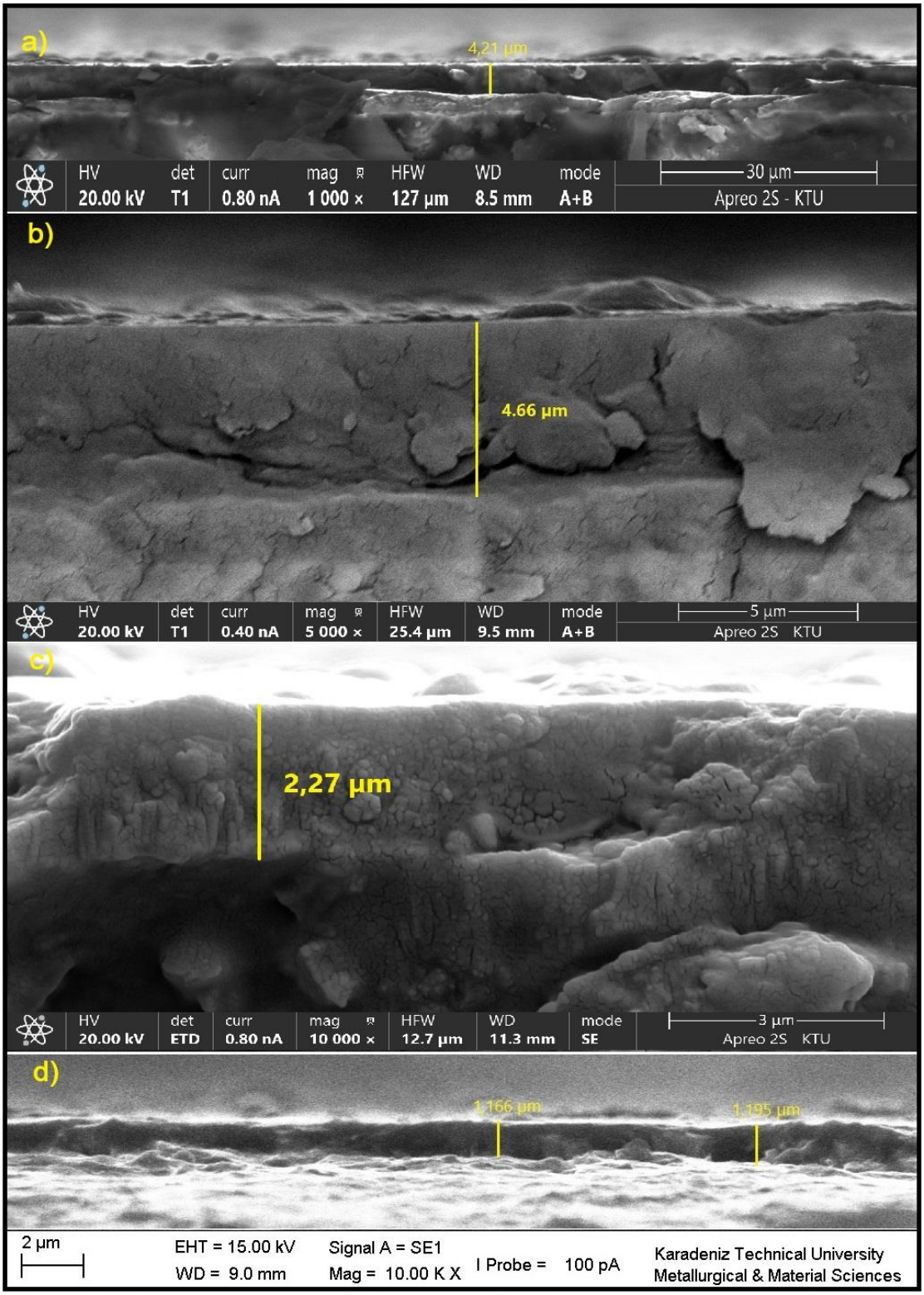
Şekil 26. TiAlN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar-Nitrürlü, c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23-Nitrürlü



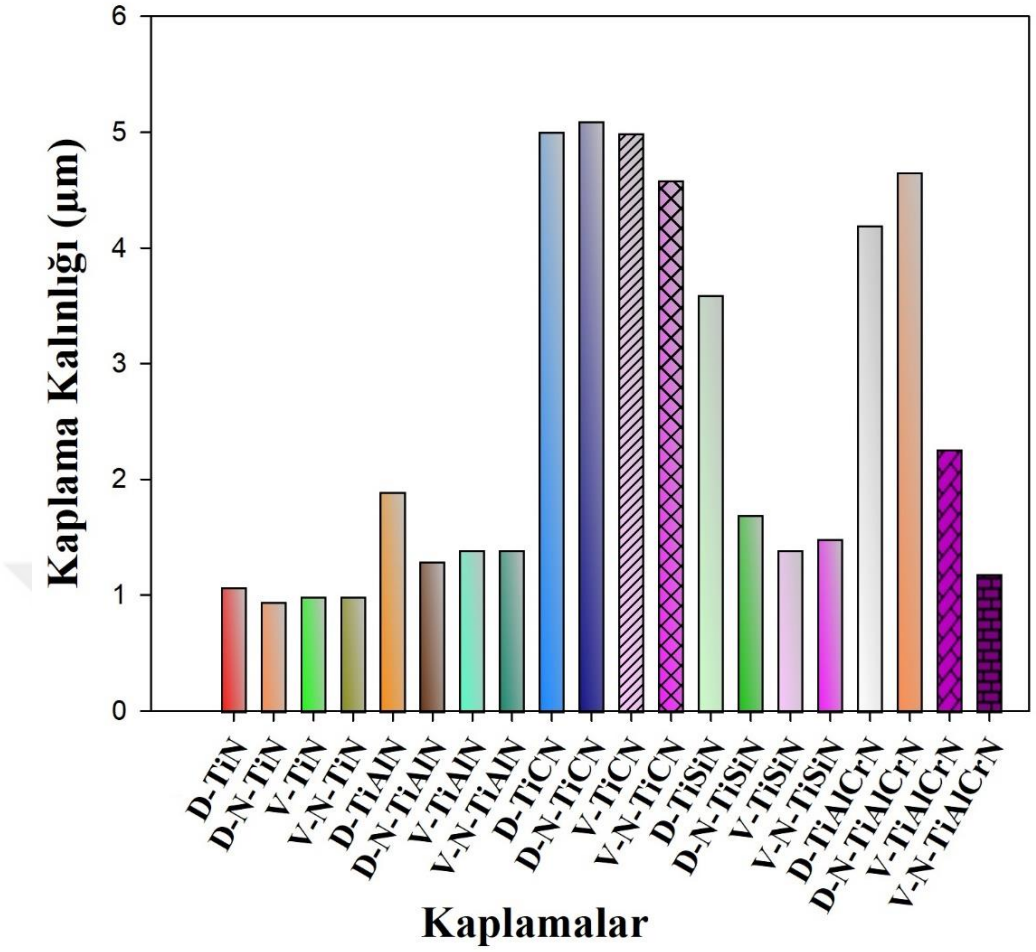
Şekil 27. TiCN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar-Nitrürlü, c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23-Nitrürlü.



Şekil 28. TiSiN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar nitrürlü, c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23 Nitrürlü.



Şekil 29. TiAlCrN kaplamanın kesit görüntüleri a) Dievar, b) Dievar-Nitrürlü c) Vanadis 23 ve d) Vanadis 23-Nitrürlü.



Şekil 30. Tüm kaplamalara ait olan kaplama kalınlıkları

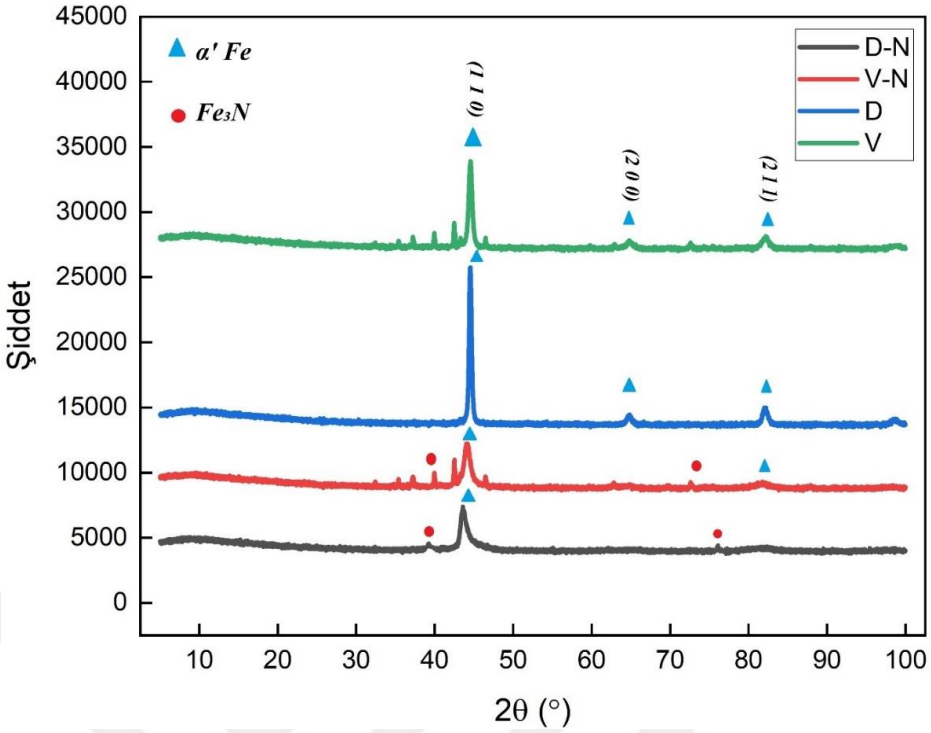
Bu çalışma sanayi odaklı olduğundan, kaplama parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmamış ve endüstride yaygın olarak kullanılan değerler tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, araştırmanın uygulamaya yönelik geçerliliğini artırmıştır. Katodik ark buharlaştırma yönteminde kaplama kalınlığı üzerinde ark akımı, biriktirme süresi, bias voltajı, katot-hedef mesafesi ve çalışma basıncı gibi temel parametreler belirleyici rol oynamaktadır. Bu parametreler plazma yoğunluğu ve iyon akışını etkileyerek kaplama büyüme hızını ve kalınlığını doğrudan kontrol eder. Kullanılan parametreler ve kaplama türlerinin farklı olması nedeniyle, elde edilen kaplama kalınlıkları da buna bağlı olarak farklı değerler almaktadır. Elde edilen kaplamalar, farklı taban malzemeler üzerinde incelenmiş ve gerek yüzey gerekse kesit morfolojisi açısından ayrıntılı bulgular ortaya konmuştur. TiN kaplamaların kalınlığı 0,95-1,08 ± 0,05 µm arasında olmaktadır. TiAlN kaplamalarda kalınlık 1,3-1,9 ± 0,05 µm arasında değişmektedir. TiCN kaplamalar 4,59-5,10 ± 0,10 µm ile en yüksek kalınlıklara ulaşmaktadır. TiSiN kaplamalarda 1,4-3,0 ± 0,10 µm aralığında

kalınlık elde edilmiştir. TiAlCrN kaplamalar ise 1,17-4,66 ± 0,10 µm arasında değişen geniş bir kalınlık aralığı sergilemiştir. Genel olarak, en kalın kaplama TiCN kaplamalarına, en ince kaplama ise TiN kaplamalarına aittir.

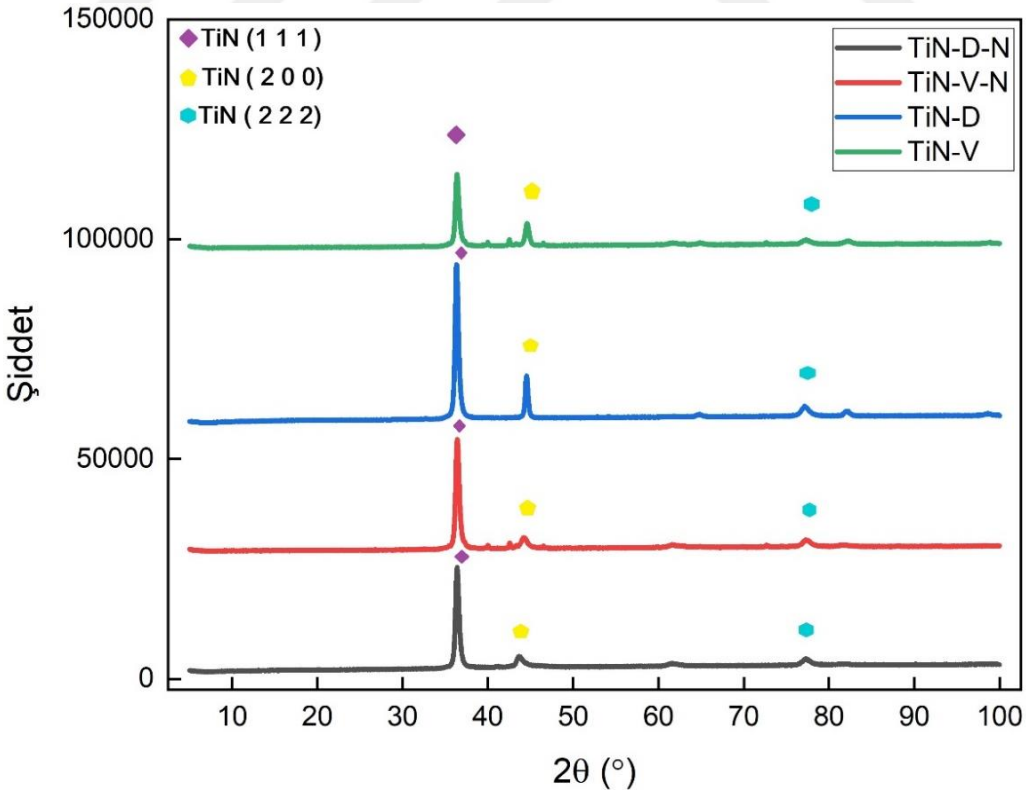
Kaplama yüzey EDS analizlerinde Fe oranı yüksek olan kaplamalarda, tabaka kalınlığının daha düşük olduğu belirlenmiştir (özellikle TiN kaplamalarında). Bu durum, yüksek Fe içeriğine sahip kaplamalarda kalınlığın azaldığını doğrulamaktadır. Ayrıca damlacıkların oranı ve boyutu TiCN kaplamasında daha fazla ve daha büyük olduğu, kaplama parametrelerinden hariç, kaplama kalınlığına bağlı olduğunu doğrulamaktadır. Birikim süreci, kaplama kalınlığını doğrudan etkileyen temel kaplama parametrelerinden biridir. Ark akımı arttığında, katottan daha fazla malzeme buharlaşır ve iyon akısı yükselir. Bu durum, kaplama kalınlığının artmasına neden olur. Ayrıca, biriktirme süresi uzadıkça yüzeye taşınan malzeme miktarı da artar. Bu nedenle kaplama kalınlığı, süreyle birlikte doğrusal olarak artış göstermektedir. Buna karşılık, çalışma basıncı ve gaz debisinin artması, plazma içerisindeki çarpışmaları artırarak iyon enerjisini düşürür ve bu da kaplama kalınlığında azalmaya neden olur. Bias voltajının yükselmesi, yeniden siçratma etkisini artırarak büyümeyi sınırlar. Ayrıca katot-altlık mesafesinin artması, iyon akışını seyreltir ve kalınlığı azaltır. Bu parametrelerin birlikte kontrolü, kaplama kalınlığını belirleyen en kritik faktörler arasında yer alır (Anders, 2008;).

3.2. XRD İncelemeleri

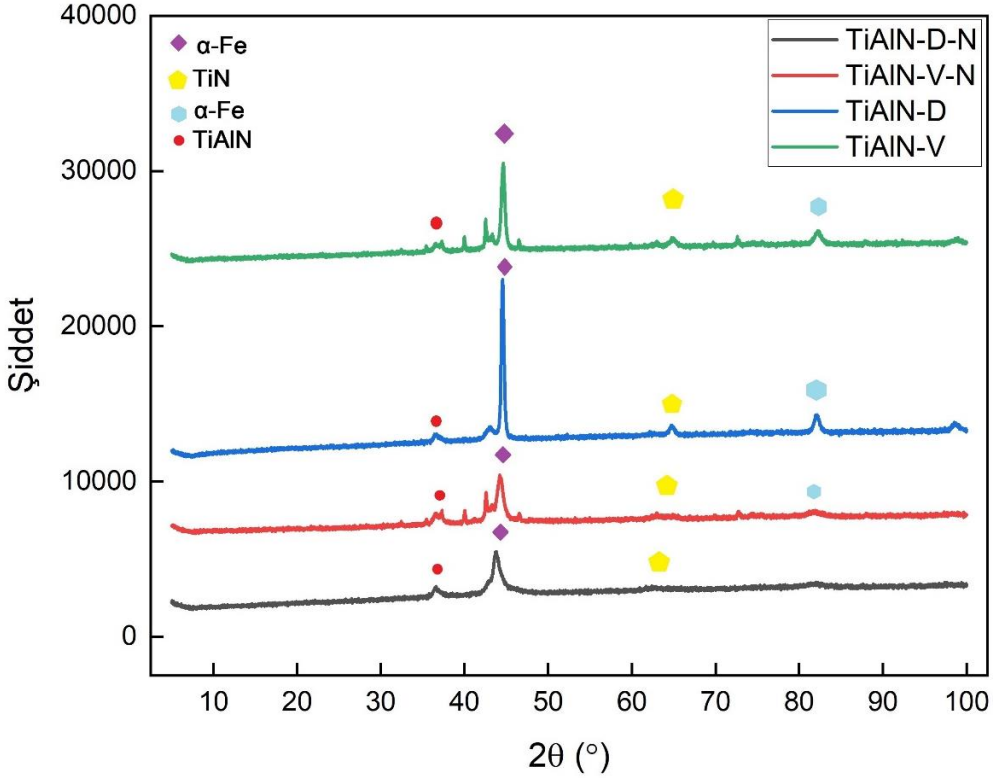
Kaplamaların faz yapısı, kristalografik yönelimi ve bileşim özelliklerinin belirlenmesinde XRD analizi temel bir yöntemdir. Bu analiz, kaplama türleri arasındaki yapısal farkların, nitrürleme etkilerinin ve katkı elementlerinin neden olduğu faz değişimlerinin değerlendirilmesine olanak sağlar. Çalışmada elde edilen XRD sonuçları Şekil 31-36 arasında sunulmuş olup, farklı kaplama türlerine ve taban malzemelere ait karakteristik pikler ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır.



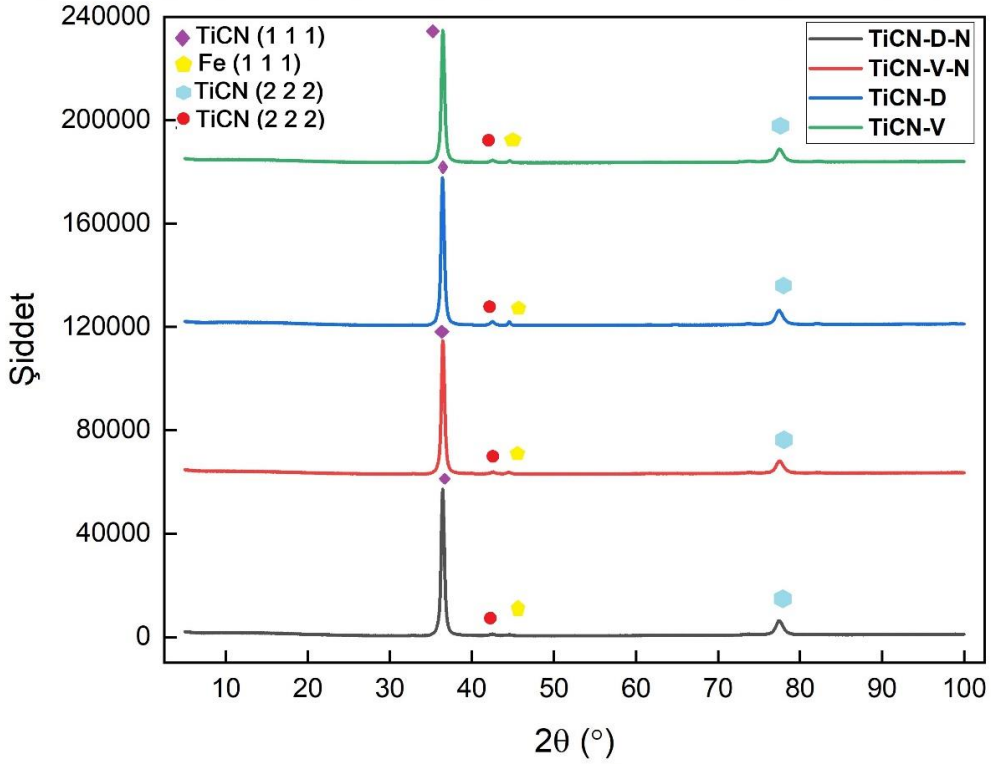
Şekil 31. Dievar ve Vanadis 23 çeliklerinin işlemsiz ve nitrürlenmiş hallerine ait XRD desenleri



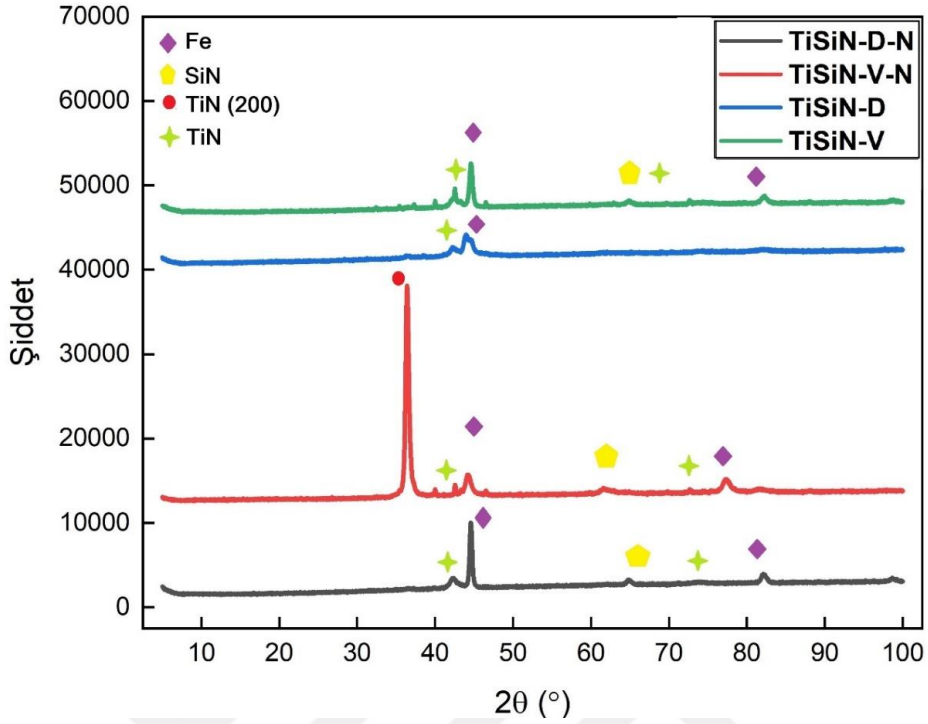
Şekil 32. TiN kaplamaya ait XRD desenleri.



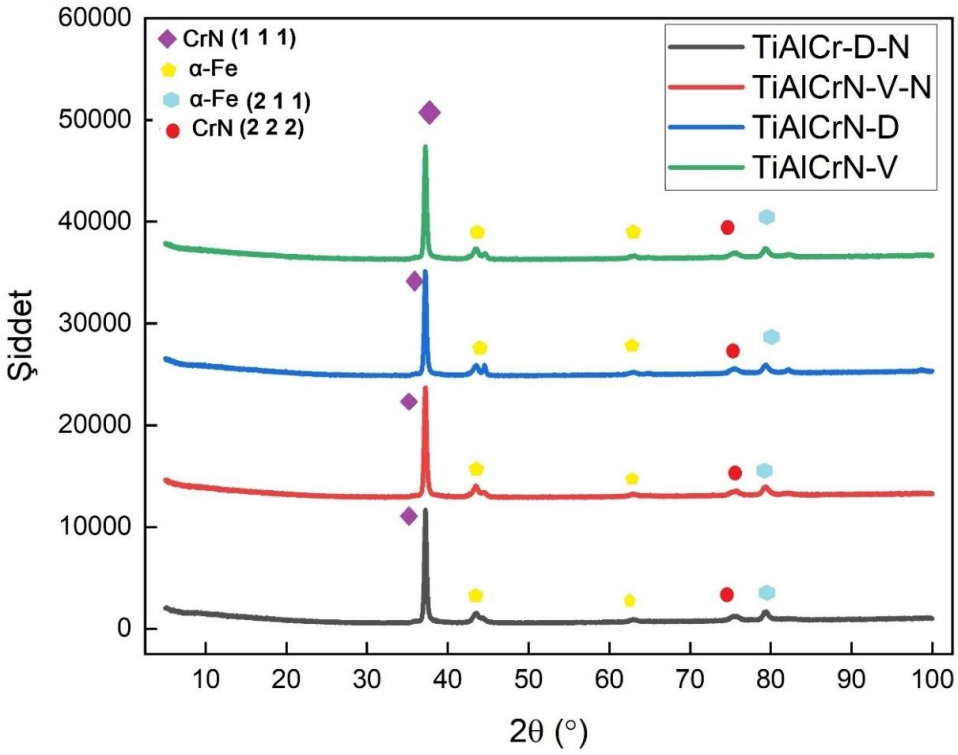
Şekil 33. TiAlN kaplamaya ait XRD desenleri



Şekil 34. TiCN kaplamaya ait XRD desenleri



Şekil 35. TiSiN kaplamaya ait XRD desenleri



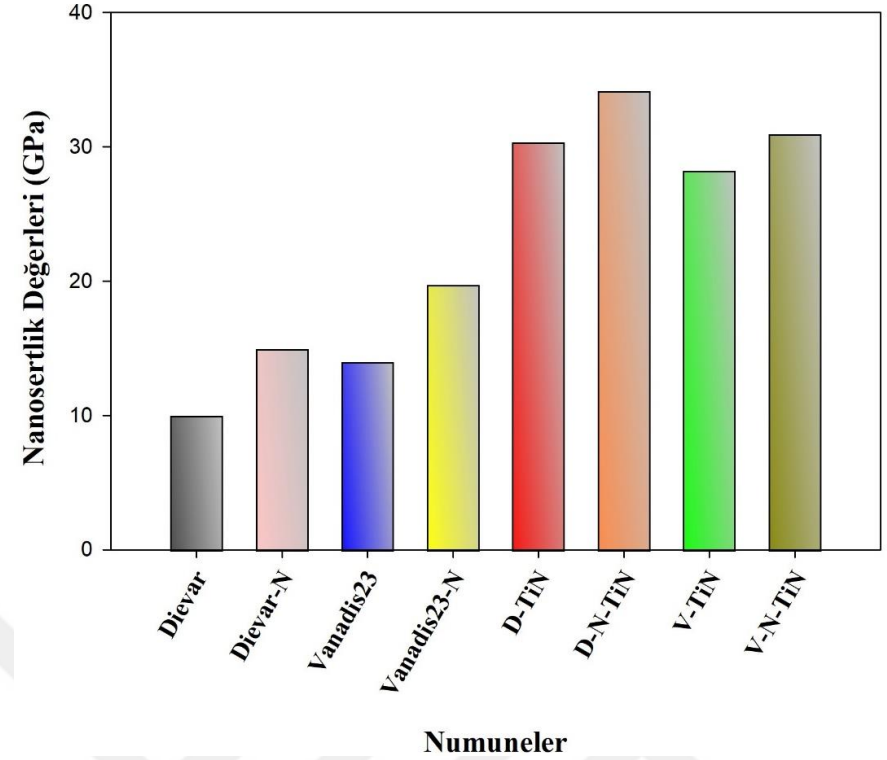
Şekil 36. TiAlCrN kaplamaya ait XRD desenleri.

X-Işını Kırınım (XRD) analizlerinde genel olarak pik yüksekliği ve genişliği, kaplama katmanlarının kristal yapısı, tane boyutu ve iç gerilim durumu hakkında temel bilgiler sunmaktadır. Pik yüksekliğinin artması, kristal örgüdeki kusurların azalmasına, kristalografik yönelimin belirginleşmesine ve faz oranının yükselmesine işaret eder. Buna karşılık pik genişliği, özellikle tane boyutu küçülmesi (Scherrer etkisi) ile kalıntı gerilim veya mikrogerilmelerin artışıyla ilişkili olabilir. Tane boyutunun küçülmesi ve mikro gerilmenin yükselmesi genellikle sertlik artışıyla sonuçlanırken (Hall-Petch etkisi), iç gerilme malzemenin kırılganlığını artırabilir (Sert, 2022; Warcholinski vd., 2020; Zhu vd., 2013). Şekil 31'de, taban malzemelerde α-Fe fazı baskın olarak gözlenirken, nitrürleme işlemi sonrasında Vanadis23-nitrürlü de Fe_3N fazına ait karakteristik piklerin ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu durum, nitrürleme ile çeliklerin yüzeyinde demir nitrür oluşumunun sağlandığını ve yüzey sertliğini artırabilecek mikroyapısal bir değişim meydana geldiğini göstermektedir (S. H. Chang vd., 2023; Moskalewicz vd., 2015; Xie vd., 2023). Pik şiddeti en yüksek Dievar çeliğine ait ve genelde pik şiddeti nitrürleme ile azaldığını sergilemektedir. Nitrürleme sonrasında pik genişliğinin artması dikkat çekmektedir. Bu durum, tane boyutunu ve sertlik gibi özellikleri etkileyebilmektedir. Şekil 32'de görülen TiN kaplamalı numunelerde ise YMK yapıya sahip TiN fazı, (111), (200) ve (222) düzlemlerine ait karakteristik piklerle tanımlanmıştır. Nitrürlenmiş tabanlarda TiN piklerinin şiddetindeki artış, kaplamanın daha yoğun ve kristal yapısının daha düzenli olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, α-Fe pikleri yalnızca bazı ince kaplama örneklerinde zayıf şekilde gözlenmiştir (Kara vd., 2019; Lee vd., 2023). En yüksek pik şiddeti TiN-D kaplamasına aittir. Pik genişliğinde fazla bir değişiklik görünmemektedir. TiN-V' de nitrürlü TiN e göre, pik şiddeti daha fazla olmaktadır. Nitrürlenmiş numunelerde pik genişliğinde hafif bir artış gözlenmektedir. Ancak bu değişim belirgin düzeyde değildir. Şekil 33'te sunulan TiAlN kaplamalarda TiN ve TiAlN fazlarının bir arada bulunduğu, Al atomlarının TiN kafesine katılmasıyla oluşan katı çözelti yapısının TiN piklerinde hafif kayma ve genleşmeye neden olduğu görülmüştür. Bu yapı, yüksek sertlik ve oksidasyon direncine katkı sağlarken, nitrürlenmiş altlıklarda pik yoğunluğundaki artış kristalitenin iyileştiğini göstermektedir (Dennis Murwamadala vd., t.y.; Sert vd., 2022; Zhang vd., 2022). TiAlN kaplamalarda, Pik şiddeti nitrürlenmiş malzemelrde düşmektedir. Bunun nedeni yüzeyde oluşan difüzyon tabakasının kristaliniteyi kısmen azaltması ve kaplama-taban malzeme ara yüzeyinde X-ışını saçılmasını artırmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Pik genişliği olarak, nitrürlü taban malzemelerde bir artış görülmektedir. Bu da tane boyutu küçülmesinden kaynaklanabilir,

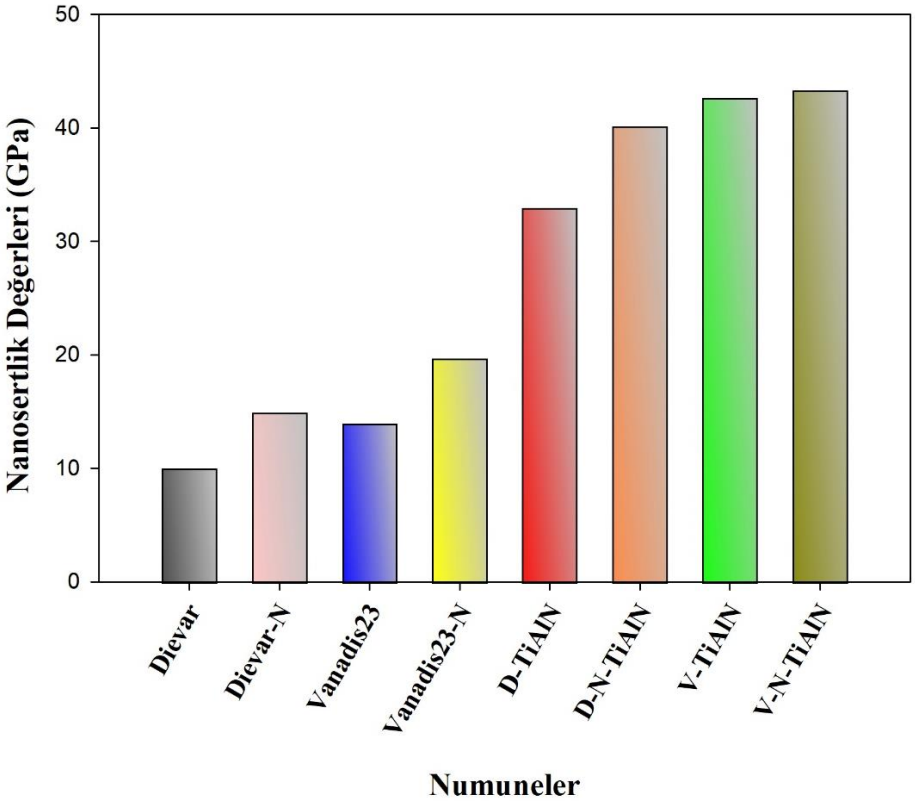
kaplama içinde daha yüksek dislokasyon yoğunluğu oluşturur ve bu da mekanik dayanımı (özellikle sertliği) artırabilir (Hall-Petch etkisi). Şekil 34'te görüldüğü gibi, TiCN kaplamalar YMK yapıda olup (111) ve (222) düzlemleri belirgin şekilde gözlenmiştir. Piklerin yüksek şiddeti ve keskinliği kaplamaların oldukça düzenli kristal yapıya sahip olduğunu ortaya koyarken, nitrürleme sonrası pik şiddetindeki artış kaplama/taban ara yüzey uyumunun geliştiğini düşündürmektedir (Yalçin vd., 2024). Pik genişliğinde önemli bir değişim gözlenmemektedir. Bu durum, tane incelmesinde belirgin bir fark oluşmamasından kaynaklanabilir. Şekil 35'teki TiSiN kaplamalarda TiN ve Si_3N_4 (amorf veya nanokristalin) fazları tespit edilmiş, SiN fazının pik genişlemesine ve kristal boyutunun küçülmesine neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, TiSiN-V-N'de 40 derece civarındaki pikin (200) düzlemi ile ilişkili olduğu ve bu pikin NaCl-tipi YMK TiN fazına karşılık geldiği belirlenmiştir (Aktarer, 2024). Son olarak, Şekil 36'da görülen TiAlCrN kaplamalarda baskın fazın CrN olduğu ve Ti ile Al elementlerinin bu faz içinde katı çözelti oluşturarak kaplamanın sertliğini artırdığı değerlendirilmektedir (Zuo vd., 2021). Genel olarak, EDS analizleri ile doğrulanan elementel bileşimler, XRD'de tespit edilen faz yapılarıyla tutarlılık sergilemiştir.

3.3. Sertlik Testi Analizleri

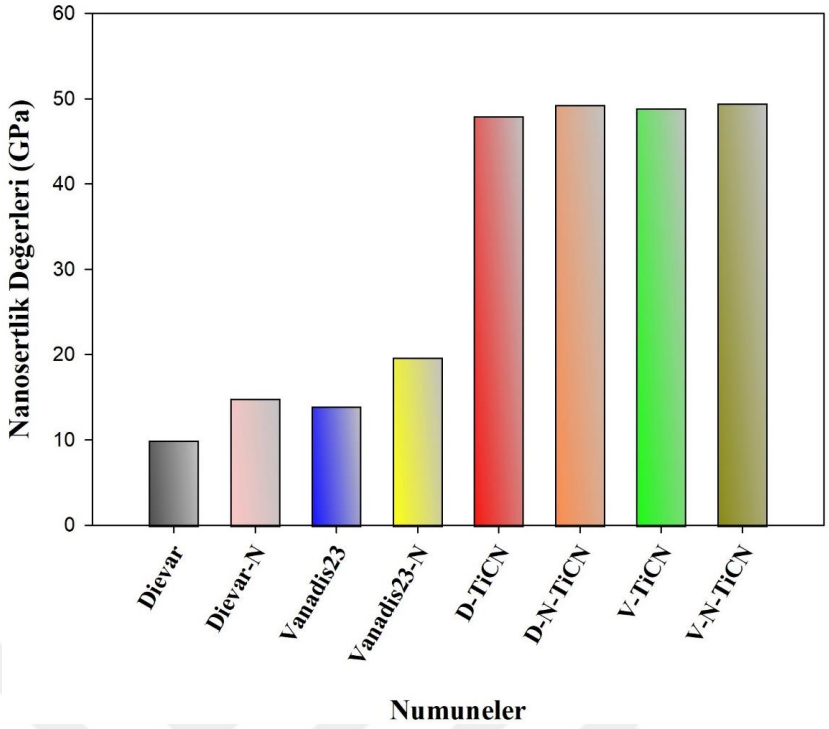
Nano sertlik testleri, kaplamaların ve nitrürleme işleminin taban malzemelerin mekanik davranışına olan etkilerini nicel olarak değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. Bu testler sayesinde kaplama tabakasının sertlik özellikleri, taban malzeme ile etkileşimi ve işlem koşullarının mekanik performansa yansıması ayrıntılı biçimde ortaya konmuştur. Sertlik testinden elde edilen bulgular Şekil 37- 42'de verilmiştir.



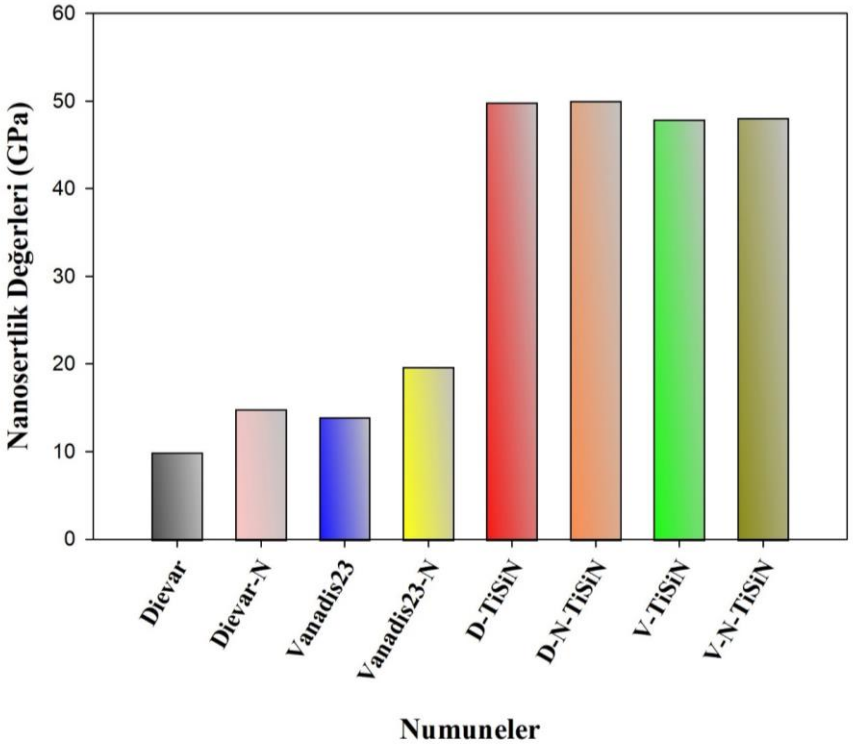
Şekil 37. Taban malzemeler ve TiN kaplamaların nanosertlik değerleri



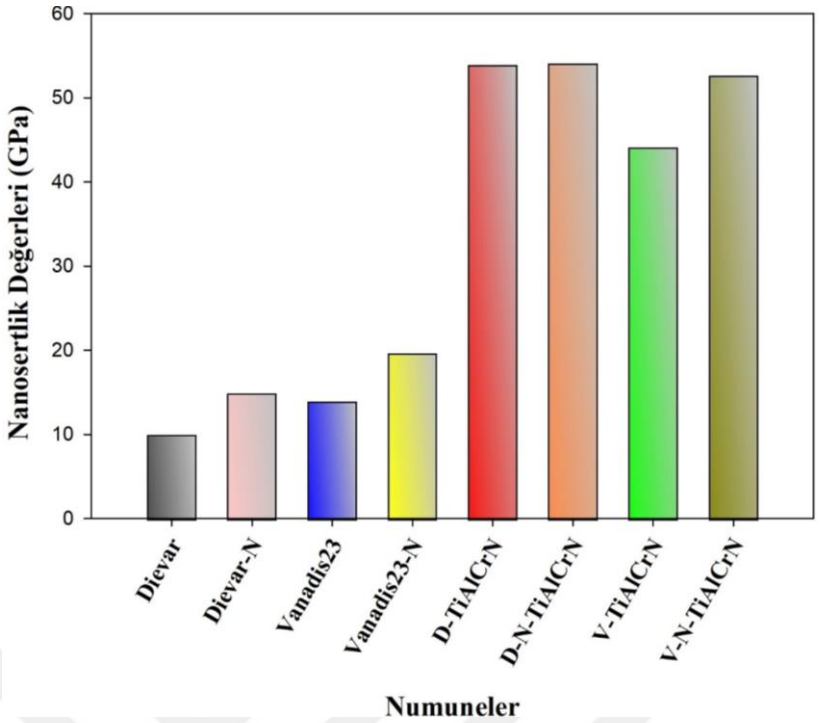
Şekil 38. Taban malzemeler ve TiAlN kaplamaların nanosertlik değerleri



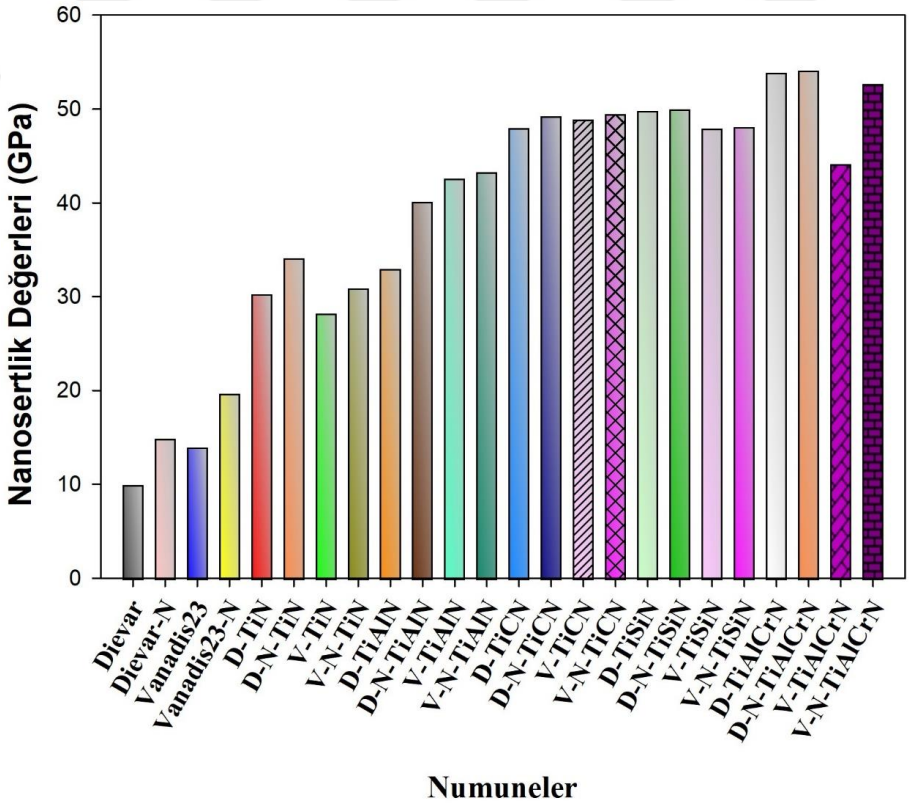
Şekil 39. Taban malzemeler ve TiCN kaplamaların nanosertlik değerleri



Şekil 40. Taban malzemeler ve TiSiN kaplamaların nanosertlik değerleri



Şekil 41. Taban malzemeler ve TiAlCrN kaplamaların nanosertlik değerleri



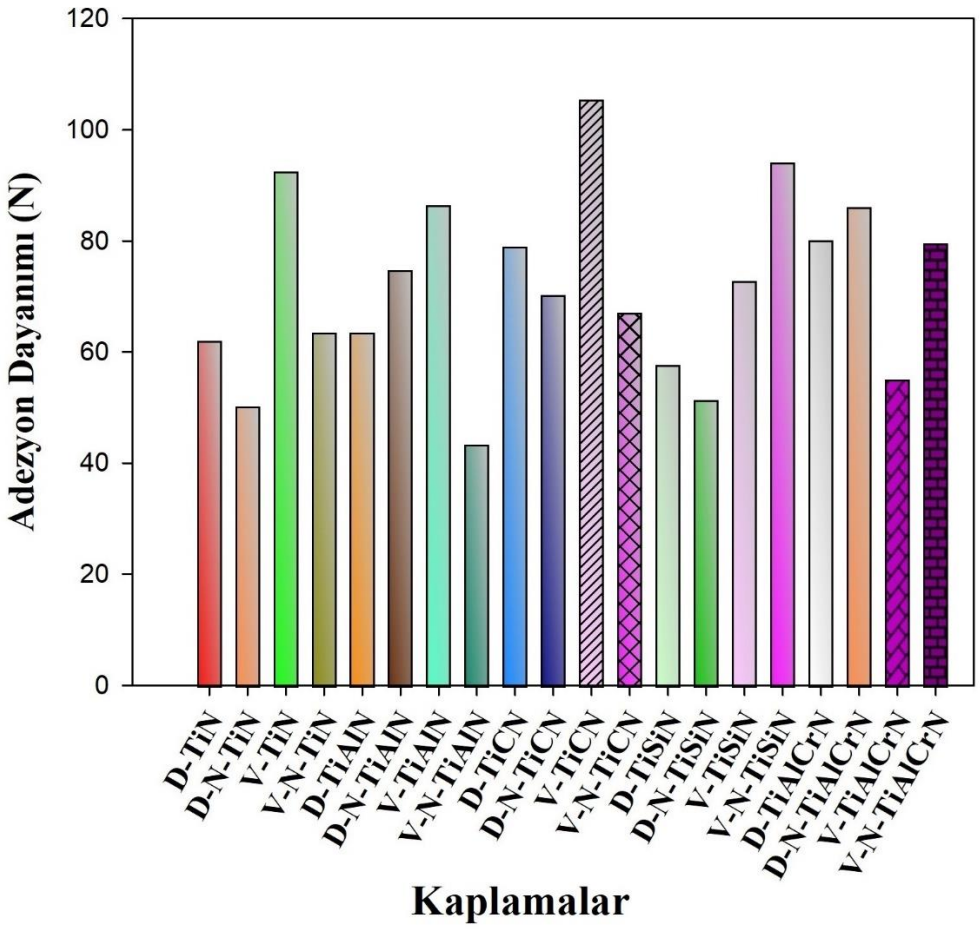
Şekil 42. Taban malzemeler ve Tum Numunelerin nanosertlik değerleri

Dievar ve Vanadis 23 çeliklerinde sertlik değerleri 10-18 GPa aralığında tespit edilmiş olup, nitrürleme işlemi ise bu değerleri bir miktar yükseltmiştir. Bu durum, nitrürleme etkisi ve XRD analizlerinde gözlenen pik genişliğindeki artışla ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, TiN kaplama uygulamasıyla sertlikte belirgin bir artış sağlanmış; özellikle nitrürlenmiş taban malzemeler üzerine kaplanan TiN tabakasında yaklaşık 34 ± 1 GPa ile en yüksek değer elde edilmiştir. TiN kaplamalarında elde edilen sertlik artışı, yoğun YMK (yüzey merkezli kübik) yapı ile güçlü Ti-N bağlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Bu durum, XRD bulgularında açıkça görülmektedir. TiAlN kaplamalar (Şekil 38), TiN'e kıyasla daha yüksek sertlik sunmuş ve nitrürlenmemiş taban malzemeler üzerinde dahi 40 ± 1 GPa seviyesinin üzerine çıkabilmiştir. Nitrürlenmiş taban malzemelerde bu değer korunmuştur. Özellikle Dievar numunesinde XRD pik genişliğindeki artış, daha ince taneli bir yapıya ve buna bağlı olarak daha yüksek sertliğe işaret etmektedir. Al ilavesinin, TiN yapısında katı çözelti sertleşmesi mekanizmasıyla sertliği yükselttiği düşünülmektedir (She-quan vd., 2011). TiCN kaplamalar (Şekil 39) 45-50 ± 1 GPa aralığında yüksek sertlik göstermiştir. Nitrürleme etkisi bu kaplamalarda sınırlı olmakla birlikte, her iki taban malzemede benzer sertlik seviyeleri elde edilmiştir. Karbon katkısının TiN yapısında daha sert ve aşınma direnci yüksek kristal yapıların oluşumunu neden olduğu değerlendirilmektedir. Ti(C,N) kaplamaların yüksek sertliği, güçlü Ti-C ve Ti-N bağlarının birlikte bulunması, katı çözelti sertleşmesi ve tane incelmesi ile açıklanabilir. C ve N atomlarının Ti örgüsünde yer değiştirmesi kafes bozulmalarına ve buna bağlı iç gerilmelere yol açar; bu da dislokasyon hareketini sınırlamaktadır. (L. Chen vd., 2008). TiSiN kaplamalar (Şekil 40) yaklaşık 48-50 ± 1 GPa sertlik değerleriyle yüksek mekanik dayanım göstermiştir. Si katkısının, amorf veya nanokristalin Si_3N_4 fazı oluşturarak nanokompozit yapı meydana getirdiği, bunun da sertliği artırdığı anlaşılmaktadır. Bu faz tane büyümesini engeller ve sertliği Hall-Petch etkisiyle artırır (Al-Rjoub vd., 2021). TiAlCrN kaplamalar (Şekil 41) ise çalışmada elde edilen en yüksek sertlik değerlerine ulaşmış, 52-54 ± 1 GPa aralığında ölçülmüştür. TiAlCrN kaplamalarda, Ti elementinin AlCrN yapısına katılmasıyla birlikte Cr, Ti ve Al atomları arasındaki boyut farklılıkları kafeste belli bir gerilime yol açmıştır. Bu durum katı çözelti sertleşmesini desteklemiş ve sonuç olarak kaplamalar yüksek sertlik özellikleri göstermiştir (Gui vd., 2021; Zuo vd., 2021). Şekil 42'de tüm kaplamaların genel sertlik değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Taban malzemelerde nitrürleme işlemi sertliği artırmış, kaplama sonrasında ise bu etki kaplama tipine bağlı olarak

değişmiştir. TiN ve TiAlN kaplamalarda nitrürlemenin sertlik artışına katkısı daha belirgin olurken, TiCN ve TiAlCrN kaplamalarda bu katkı sınırlı kalmıştır.

3.4. Çizik Testi Bulguları

Bu bölümde, kaplamaların mekanik dayanımı ve taban malzemeyle olan yapışma performansını değerlendirmek için uygulanan çizik testlerinden elde edilen kritik yük değerleri Şekil 43'te verilmiştir.



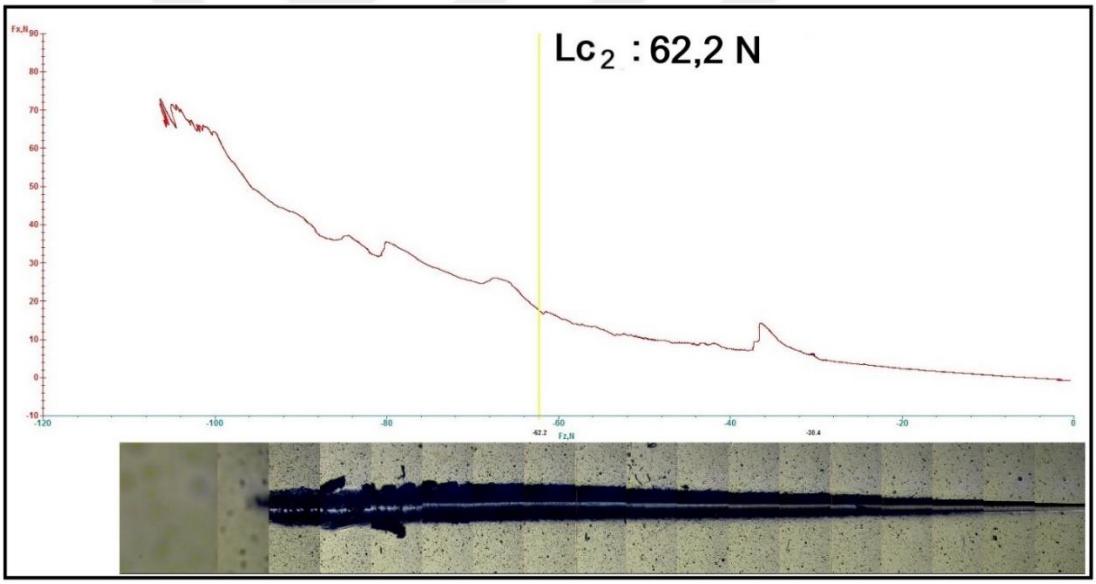
Şekil 43. Tüm kaplamaların Çizik deneyinde elde edilen adezyon dayanımı.

Katodik ark buharlaştırma PVD kaplama yönteminde adezyon dayanımı (Lc_2), esas olarak iyon akışı, bias voltajı, ark akımı, taban malzeme sıcaklığı ve odacık basıncı gibi işlem parametrelerinden etkilenmektedir. Bu parametreler, kaplama sırasında iyon enerjisini, plazma yoğunluğunu, ara yüz kompaktlaşmasını ve tabaka büyüme kinetiğini belirleyerek kaplama-taban malzeme arasındaki mekanik ve kimyasal bağlanmayı doğrudan

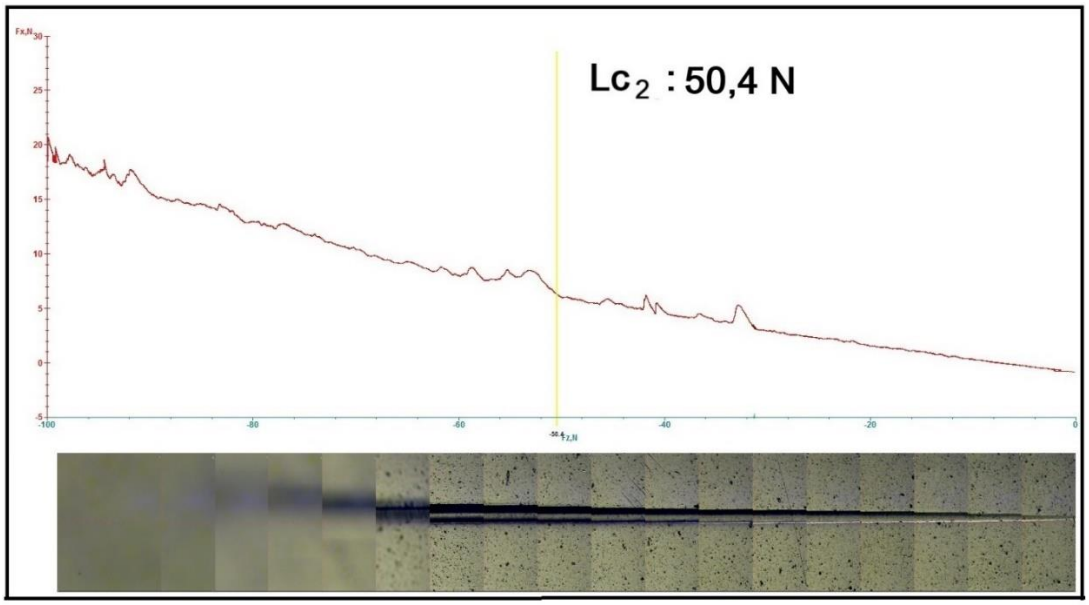
şekillendirir. Yüksek iyon bombardımanı, yoğun ve iyi bağlanmış bir tabaka oluşumunu desteklerken; aşırı iyon enerjisi veya uygunsuz basınç koşulları mikrogerilim birikimine ve adezyon kaybına yol açabilir, bu yüzden optimum olmalıdır. Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalarla uyumlu olacak şekilde optimum kaplama parametreleri (bias voltajı, ark akımı, basınç, sıcaklık ve süre) kullanılmış ve her kaplama gruplarında aynı koşullar korunmuştur. Böylece, sonuçların endüstriyel geçerliliği artırılmış ve uygulamaya yönelik bir nitelik kazandırılmıştır. Bu nedenle, kaplamalar arasındaki adezyon farklılıklarının işlem parametrelerinden değil, esas olarak kaplama-taban malzeme arayüzünün mikroyapısal karakteristiği, difüzyon tabakasının morfolojisi ve kaplama malzemelerinin kimyasal/termomekanik uyumu gibi faktörlerden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Şekil 43'te görüldüğü üzere, çizik testleri sonucunda elde edilen Lc_2 değerleri, kaplama-taban malzeme etkileşiminin oldukça karmaşık bir mekanizmaya bağlı olduğunu göstermektedir. Genel olarak hem taban malzeme türü hem de nitrürleme işlemi Lc_2 değerlerinin dağılımında belirleyici rol oynamaktadır.

TiN kaplamalı Vanadis 23 numunesinde (TiN-V) Lc_2 değeri 92,6 N olarak ölçülmüş ve güçlü ara yüz bağları elde edilmiştir. Ancak aynı alt tabakanın nitrürlenmiş halinde bu değerlerin düştüğü dikkat çekmektedir. Benzer şekilde, Dievar üzerinde nitrürleme sonrası Lc_2 değerlerinde düşüşler kaydedilmiştir. TiAlN kaplamasında adezyon davranışı taban malzemeye göre belirgin farklılık göstermektedir. Dievar çeliğinde nitrürleme sonrası adezyon dayanımı artarken, Vanadis 23'te belirgin bir azalma gözlenmiştir. Karbon katkılı (TiCN) kaplamalar ise çalışmada en yüksek Lc_2 değerlerini elde edilmiş, yaklaşık 100 N mertebesine ulaşan sonuçlarla öne çıkmıştır. Bu bulguların, kaplama kalınlığı, TiCN kaplamalarının yüksek sertlik performansı, yüzey pürüzlülüğü ve kaplama-taban malzeme arasındaki bağ ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. TiSiN kaplamalarında nitrürleme etkisi taban malzemeye göre belirgin farklılık göstermektedir. Dievar çeliğinde nitrürleme sonrasında adezyon dayanımı hafifçe azalmıştır (57,9 N değerinden 56,7 N değerine). Buna karşılık, Vanadis 23 çeliğinde nitrürleme belirgin bir iyileşme sağlamıştır (72.9 N değerinden 94.2 N değerine). TiAlCrN kaplamasında nitrürleme sonrası adezyon dayanımı her iki taban malzemede de artış göstermiştir. Dievar çeliğinde değer 80.3 N'den 86.2 N'e, Vanadis 23 çeliğinde ise 55.3 N'den 79.7 N'e yükselmiştir. Ayrıca, TiAlCrN kaplamalarda sertlik bulguları ile karşılaştırıldığında, adezyon dayanımının benzer bir eğilim gösterdiği ve her iki sonucun birbiriyle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

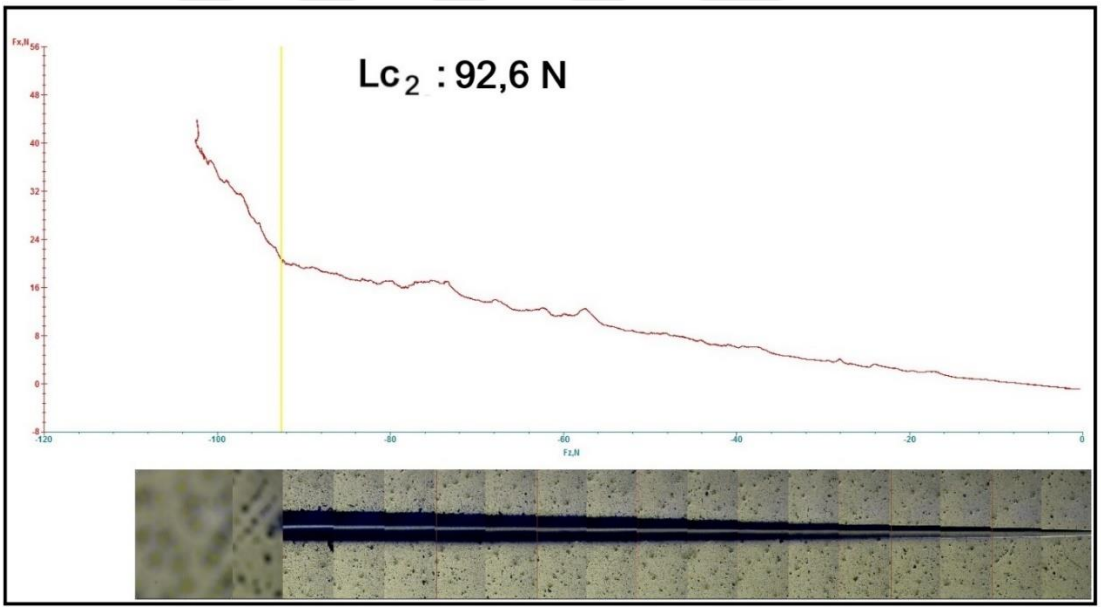
Genel olarak en yüksek Lc_2 değeri TiCN-Vanadis (105.5 N), en düşük değer ise TiAlN-Vanadis-N (43.5 N) olarak belirlenmiştir. Nitrürleme işlemi bazı kaplamalarda (TiAlCrN, V-TiSiN gibi) adezyonu artırırken, bazılarında (TiN ve TiCN gibi kaplamalarda) tersine bir etki göstermiştir. Bu durum, yapışmanın tek bir parametreye bağlı olmadığını; sertlik, kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü gibi faktörlerin birlikte belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde de belirtildiği üzere, beyaz tabaka (ε-$Fe_{2-3}N$ ve γ'-Fe_4N) tamamen uzaklaştırılmış olsa bile, bazı kaplamalarda adezyonun azalması ısıl genleşme farkları, difüzyon tabakasındaki azot dağılımının homojensizliği veya gevrek ara fazların oluşumu gibi nedenlerle açıklanmaktadır (Aktaş Çelik vd., 2024). Dolayısıyla, adezyon davranışı çok etkenli bir yapıya sahiptir ve nitrürleme etkisi kaplama türü ile taban malzemenin yüzey özelliklerinin etkileşimine bağlı olarak değişmektedir. Kaplanmış numunelere ait çizik testi grafikleri Şekil 44-63 arasında gösterilmiştir.



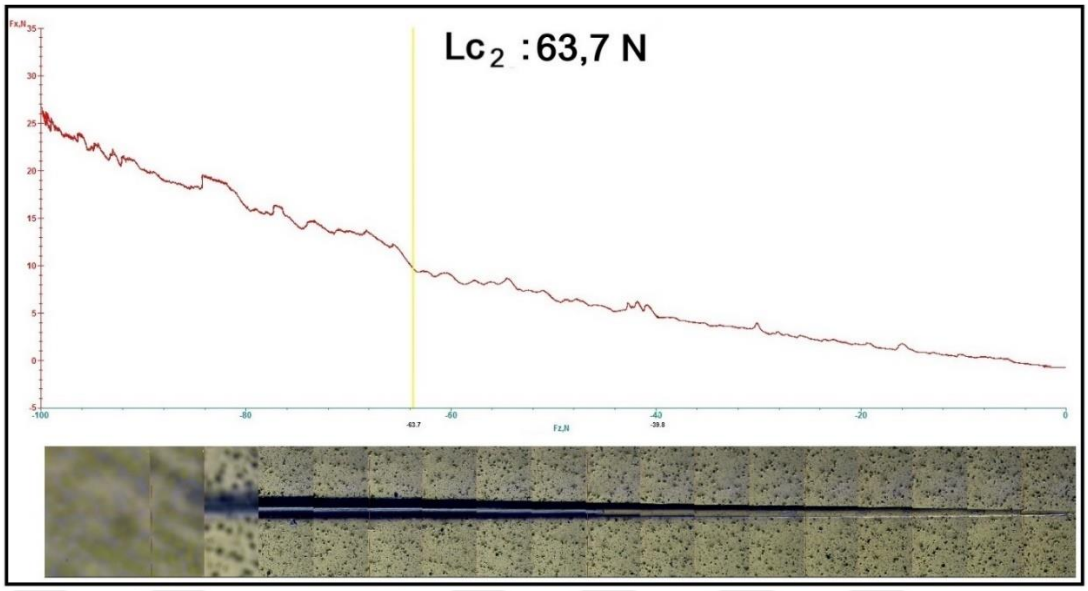
Şekil 44. TiN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği



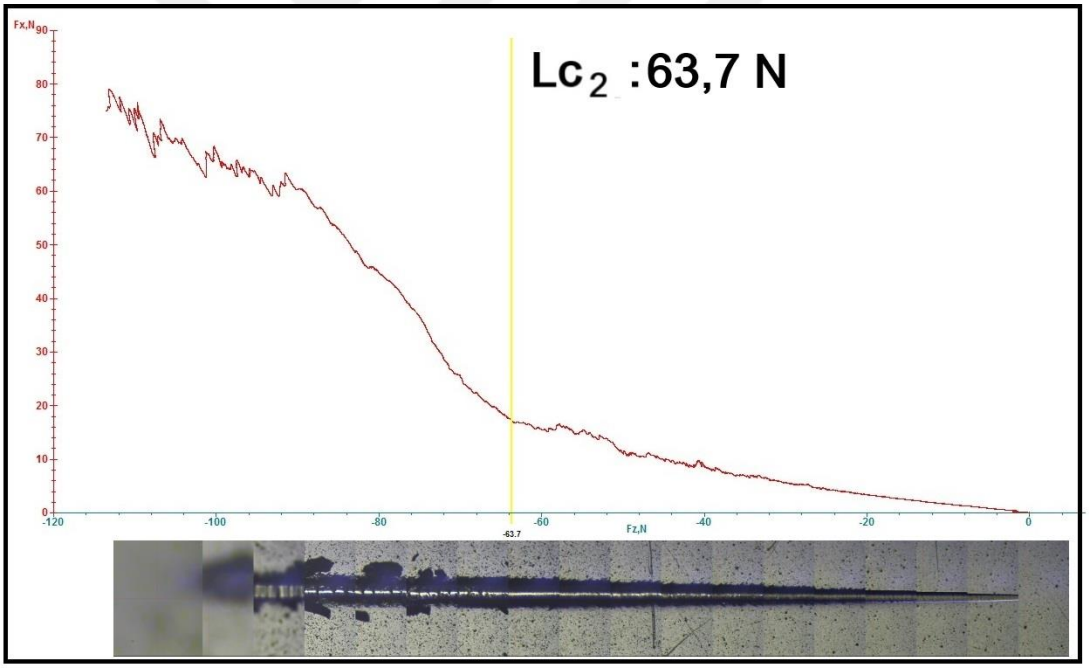
Şekil 45. TiN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği



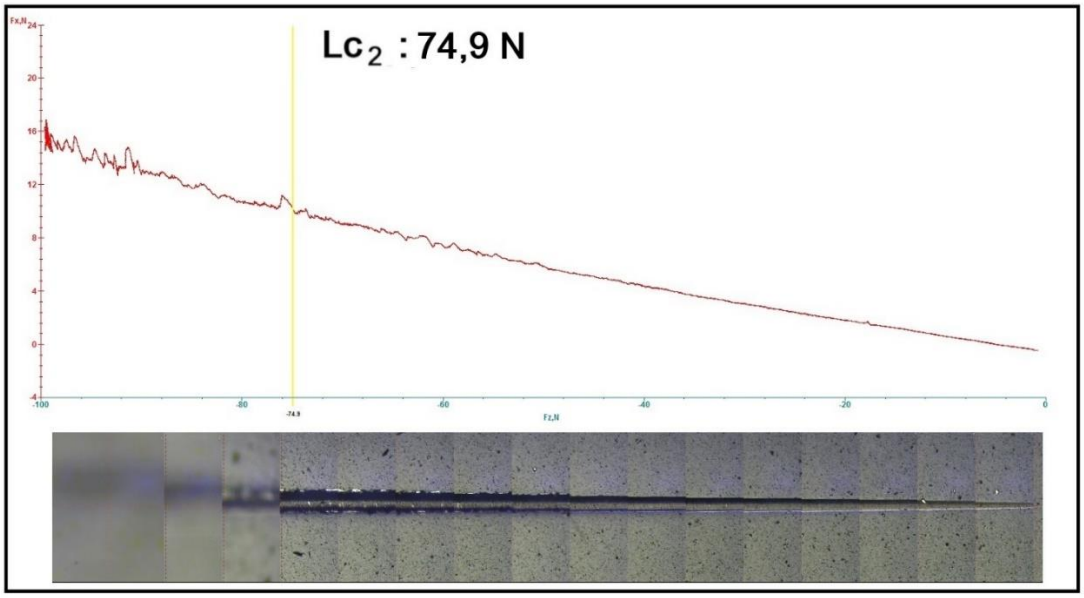
Şekil 46. TiN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği



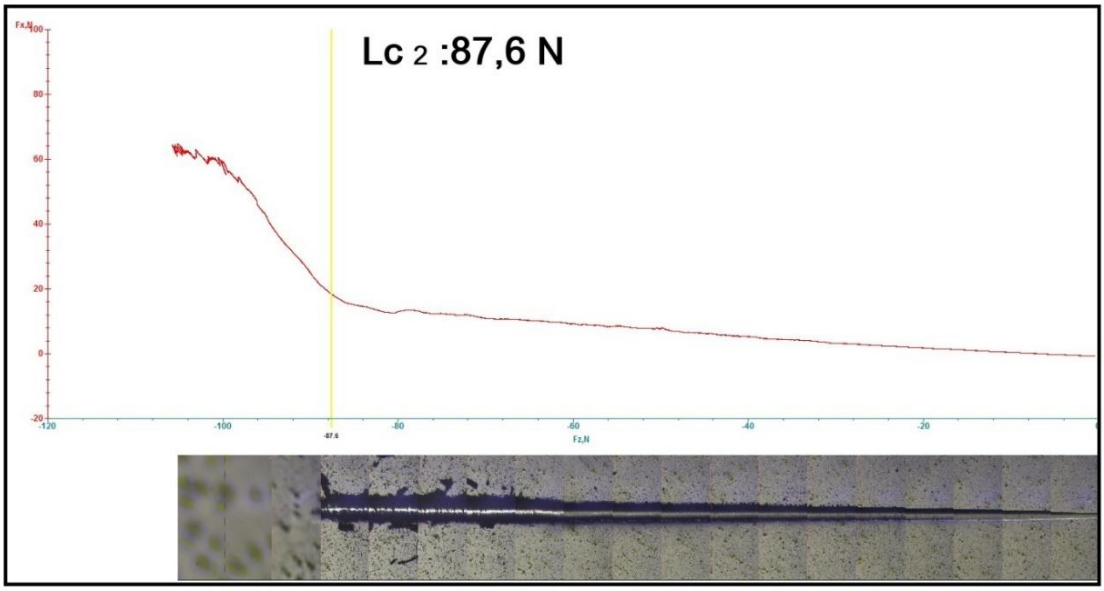
Şekil 47. TiN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiği



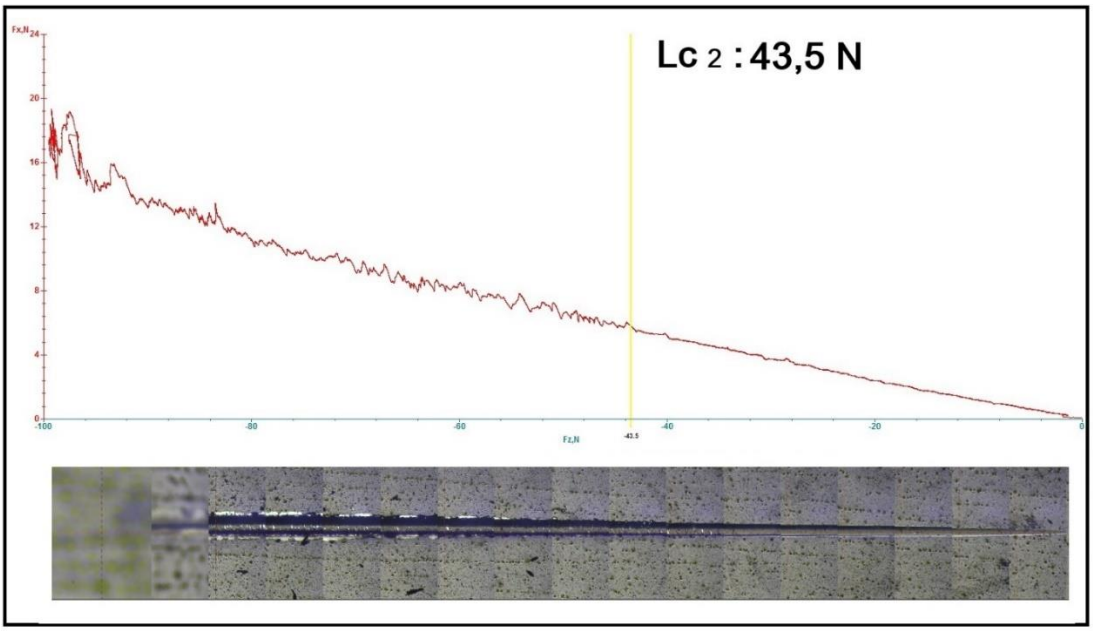
Şekil 48. TiAlN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği



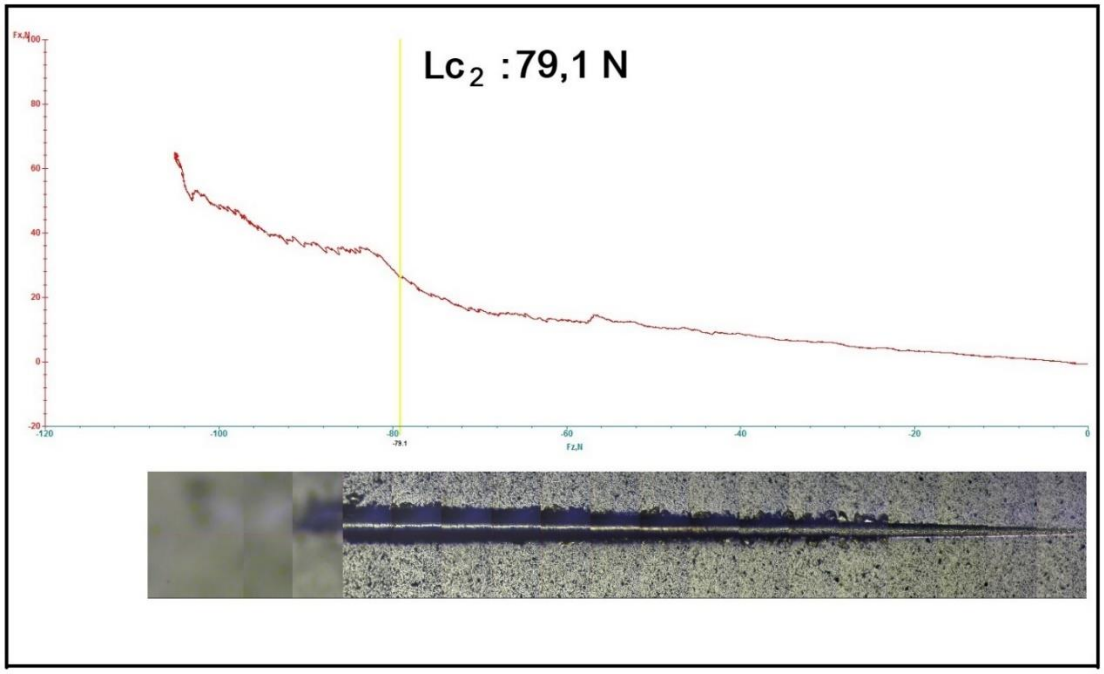
Şekil 49. TiAlN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği



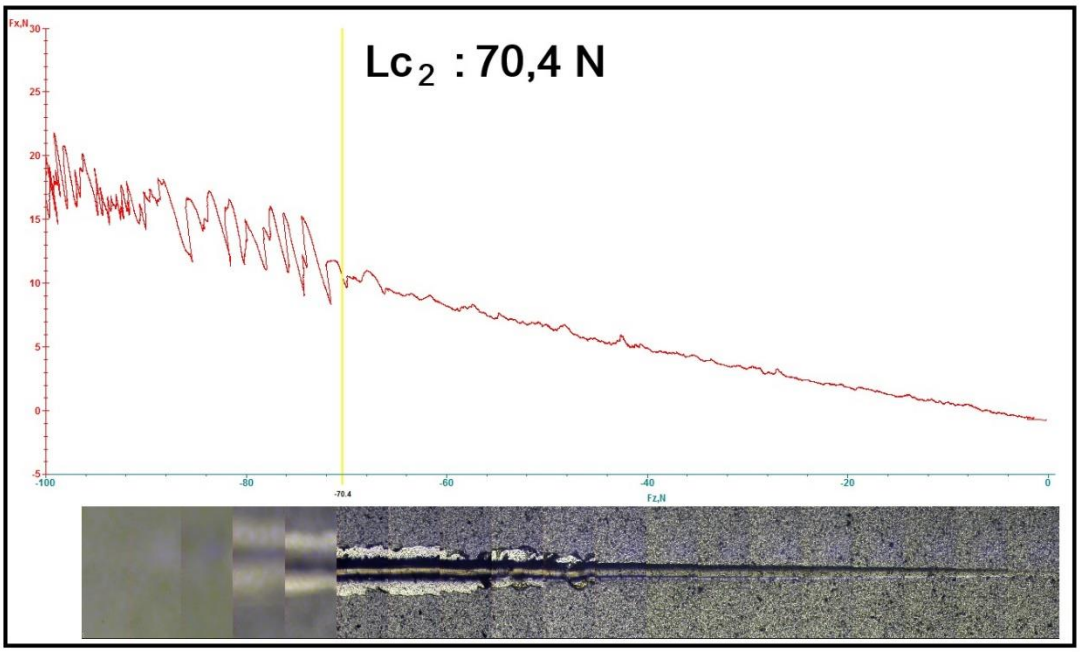
Şekil 50. TiAlN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği



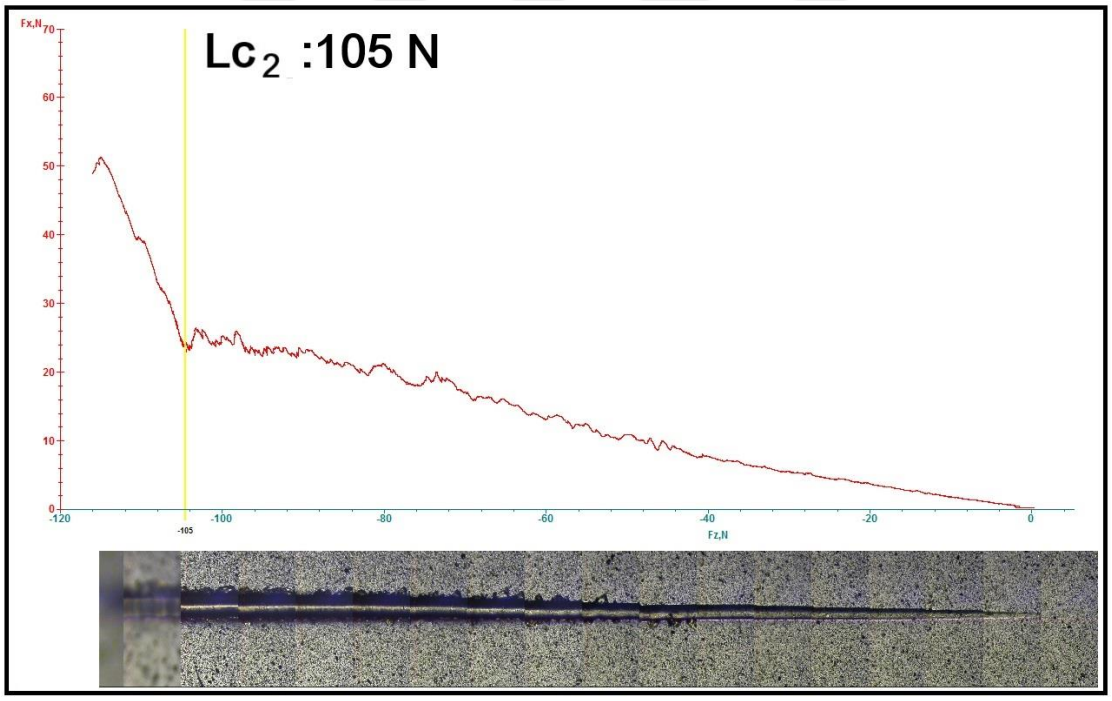
Şekil 51. TiAlN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiği



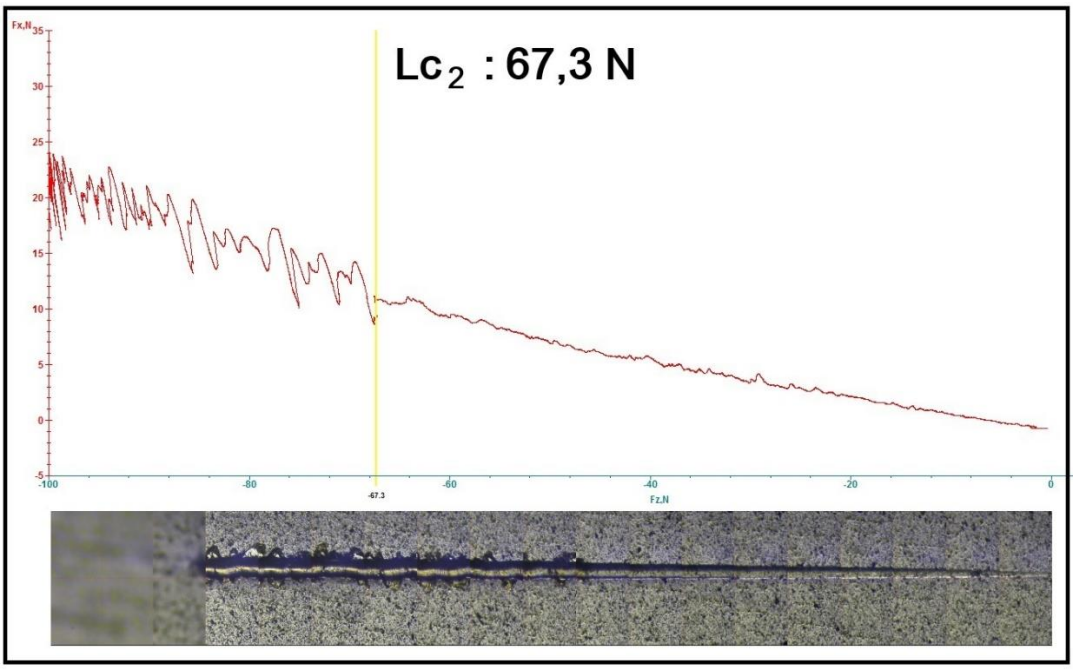
Şekil 52. TiCN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği



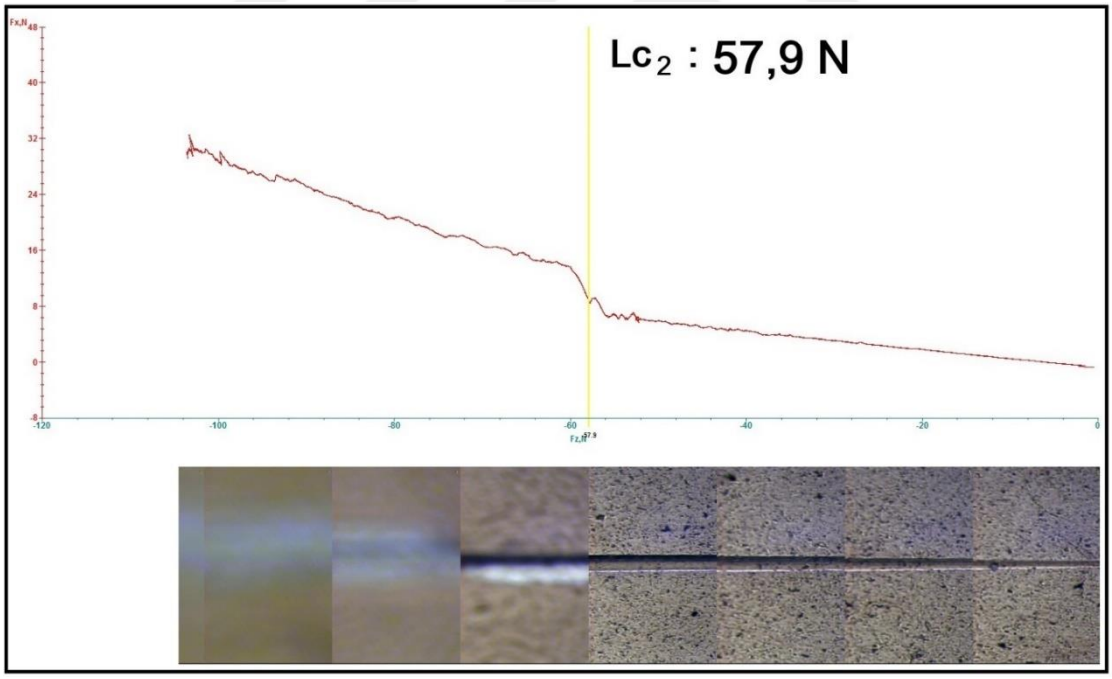
Şekil 53. TiCN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği



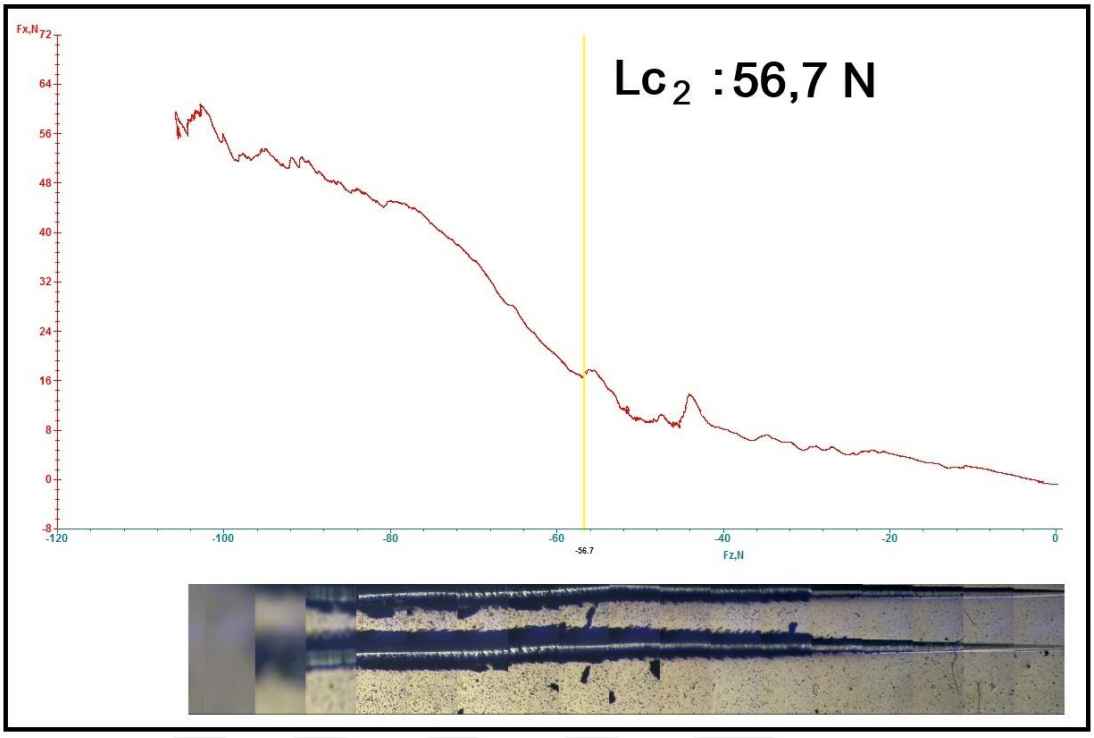
Şekil 54. TiCN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği



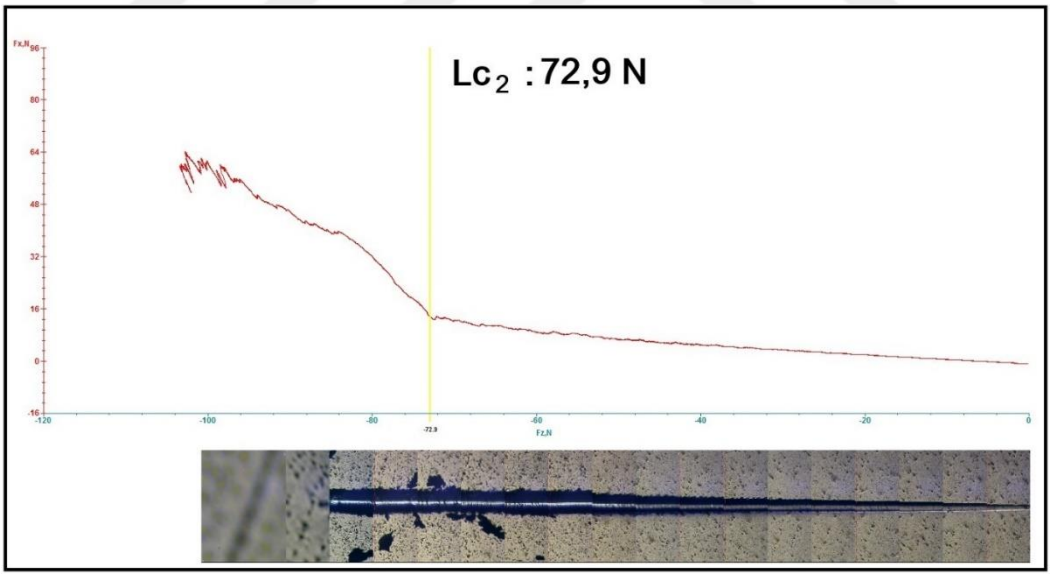
Şekil 55. TiCN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiği



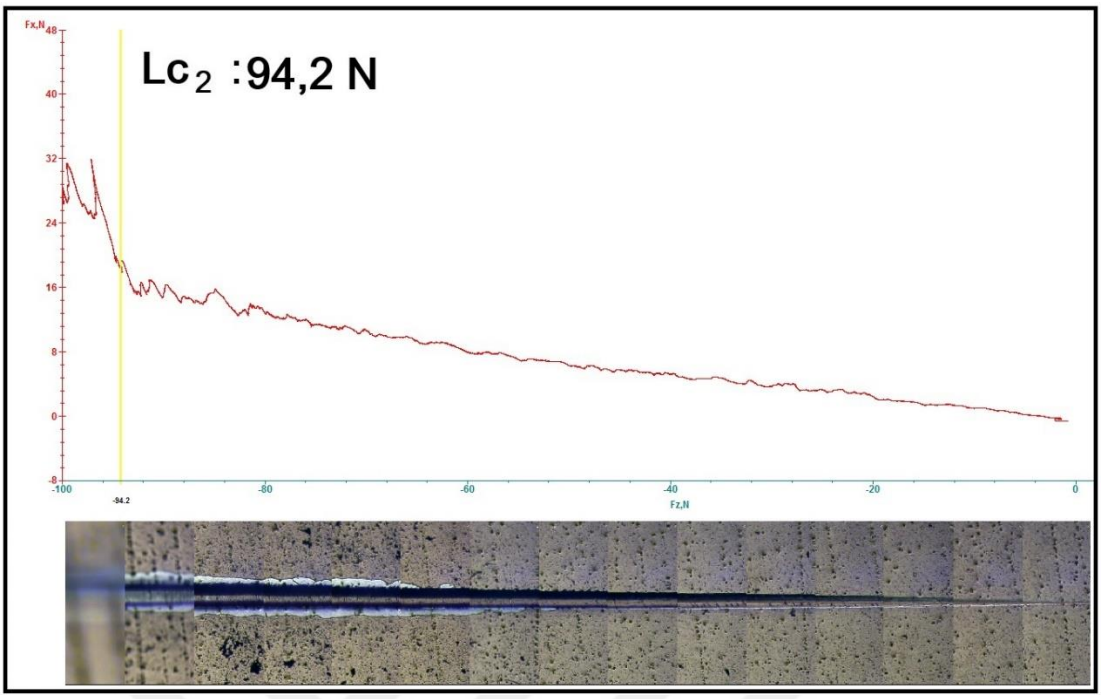
Şekil 56. TiSiN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği



Şekil 57. TiSiN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği

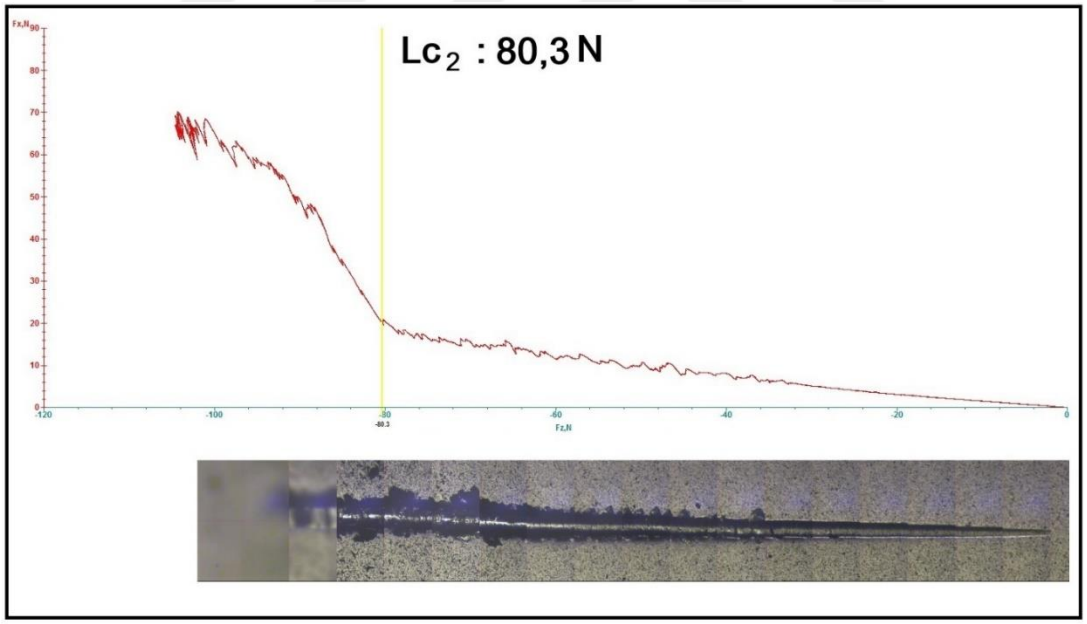


Şekil 58. TiSiN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği

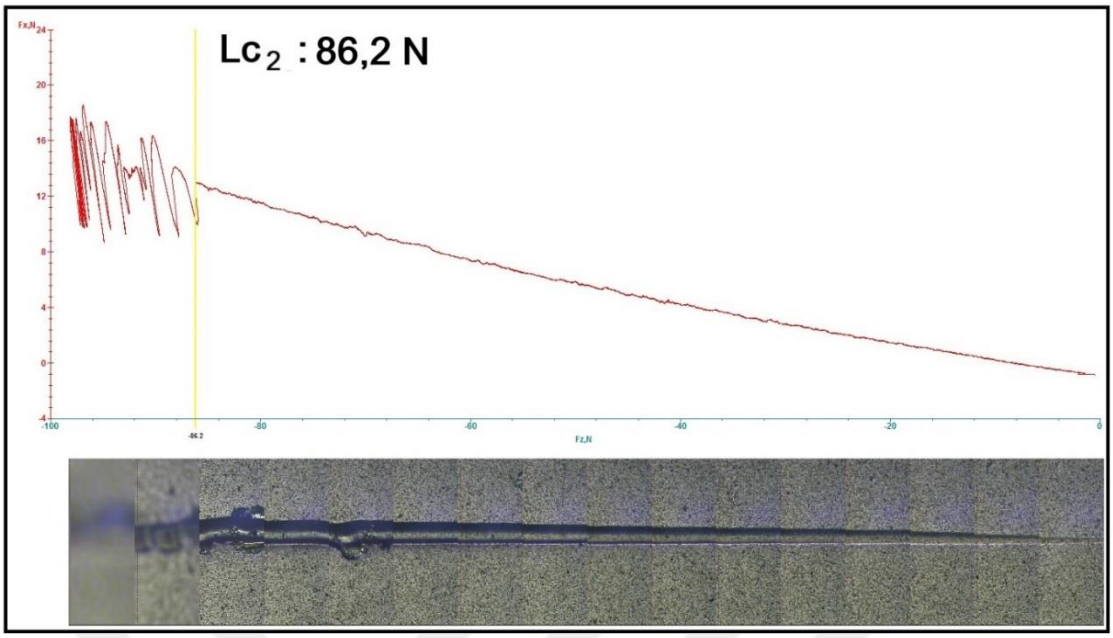


Şekil 59. TiSiN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiğ

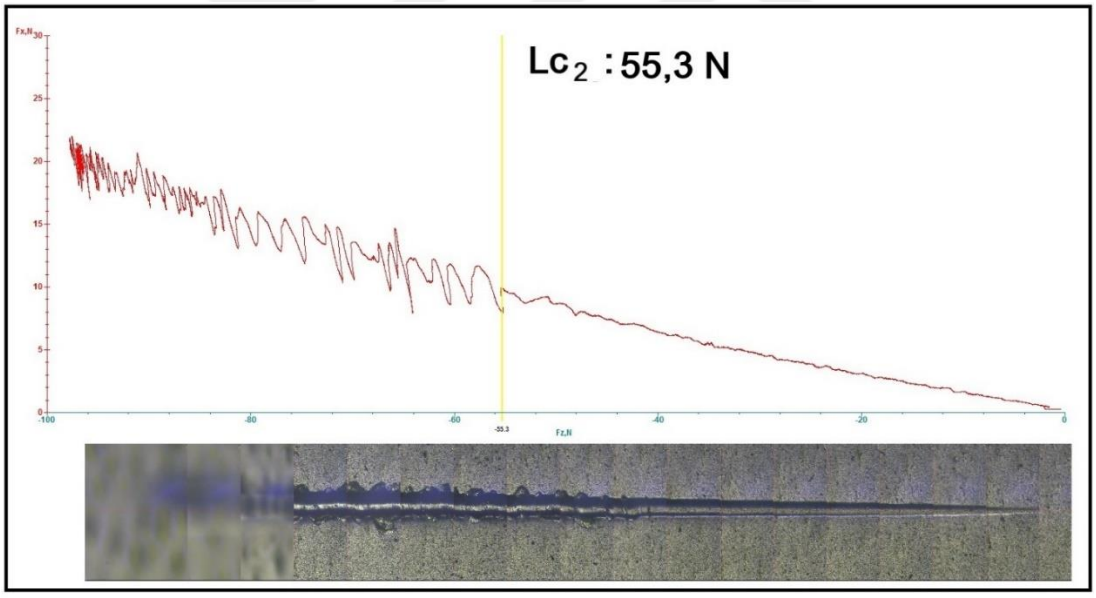
.



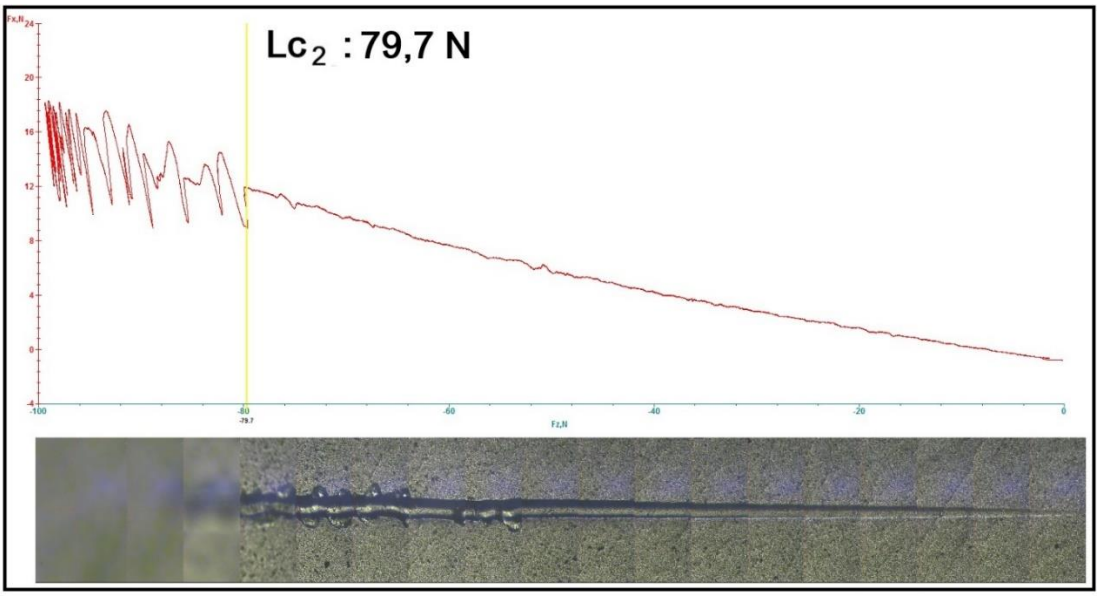
Şekil 60. TiAlCrN ile kaplanmış Dievar numunesine ait çizik testi grafiği



Şekil 61. TiAlCrN ile kaplanmış nitrürlü Dievar (D-N) numunesine ait çizik testi grafiği



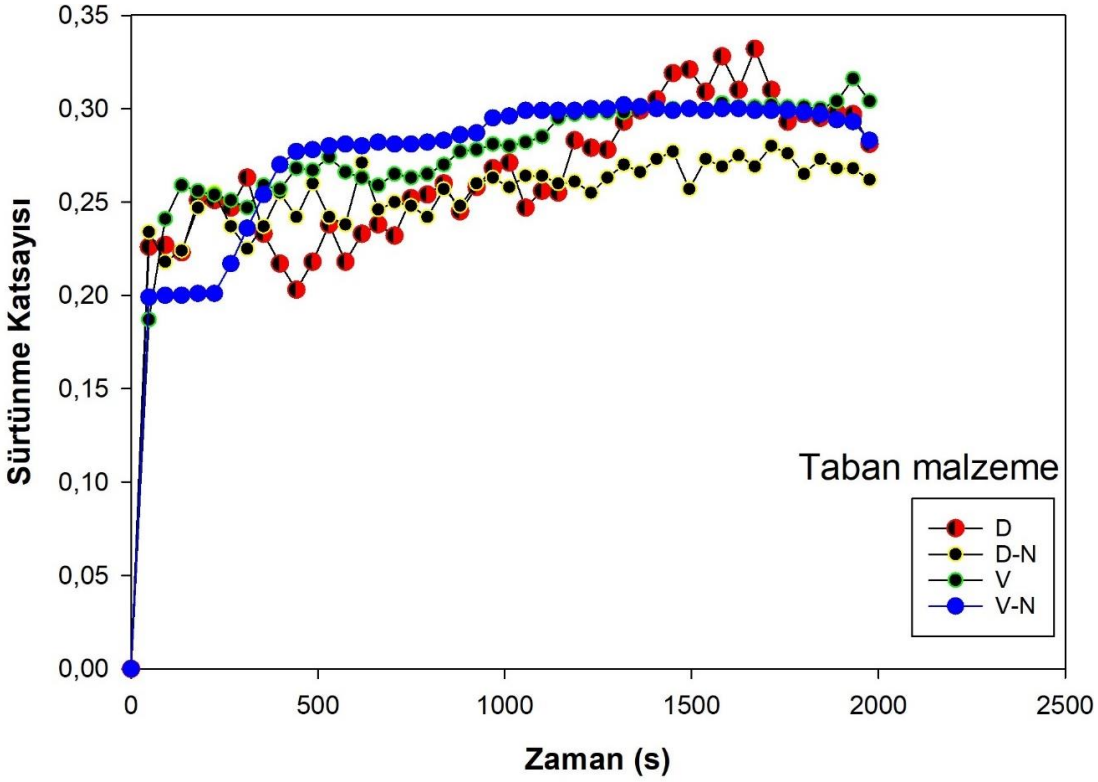
Şekil 62. TiAlCrN ile kaplanmış Vanadis 23 (V) numunesine ait çizik testi grafiği



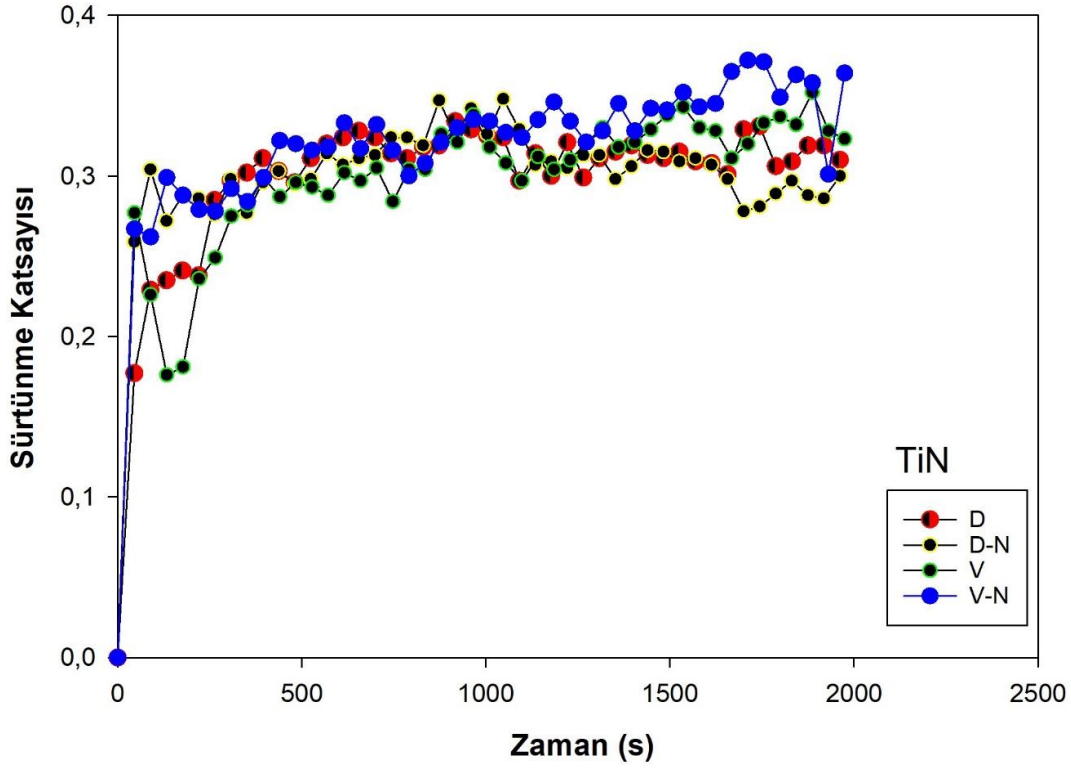
Şekil 63. TiAlCrN ile kaplanmış nitrürlü Vanadis 23 (V-N) numunesine ait çizik testi grafiği

3.5. Bilye-Disk Aşınma Testi Analizeri

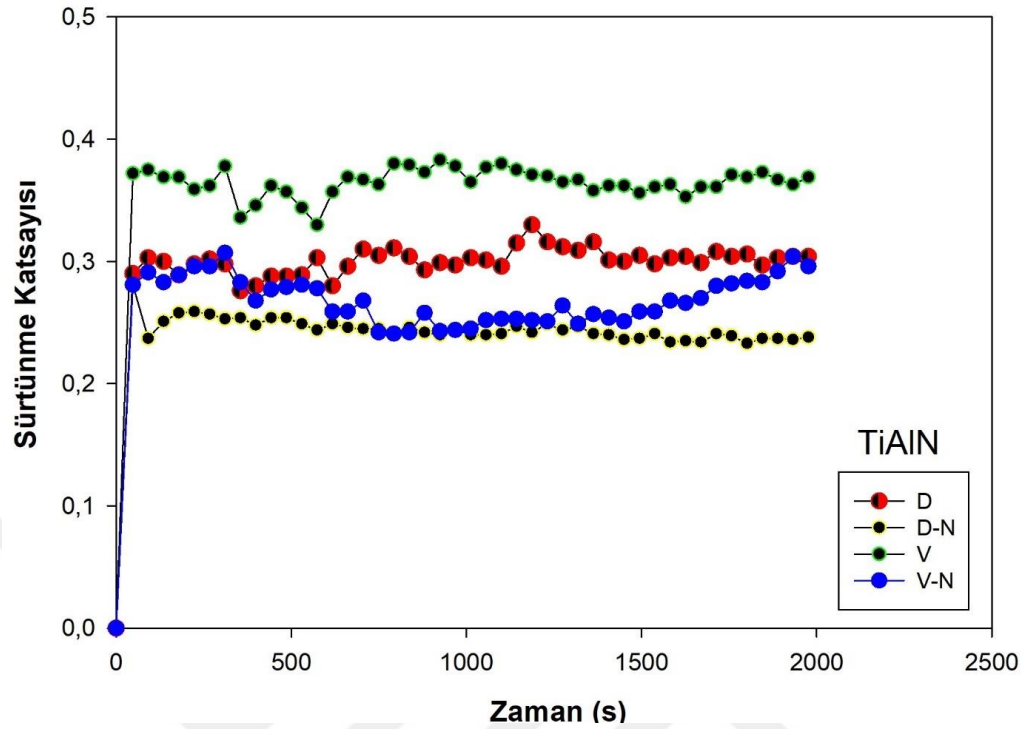
Bilye-disk aşınma testleri, numunelerin tribolojik davranışları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için önemli bir yöntemdir. Bu testler, sürtünme katsayısının zamanla değişimini takip ederek yüzey-film oluşumu, ara yüz kararlılığı ve aşınma mekanizmaları hakkında doğrudan bilgi sağlamaktadır. Taban malzeme ve kaplamaların sürtünme ve aşınma özellikleri, karşı yüzey olarak Al_2O_3 bilye kullanılarak oda sıcaklığında ve belirlenen parametrelerde uygulanmıştır. Şekil 64-69'de, numunelerden elde edilen sürtünme katsayısı-zaman eğrileri sunulmaktadır. Sürtünme katsayısı-zaman grafikleri incelendiğinde, yaklaşık ilk 100 saniyeye kadar kararsız bir sürtünme davranışı gözlenmiş, bu sürenin ardından deney bitimine kadar daha kararlı bir eğilim sergilediği belirlenmiştir. Başlangıçtaki sürtünme katsayısındaki hızlı artış, rodaj aşamasında temas eden yüzey pürüzlülüğünün birbirine uyum sağlamasından kaynaklanmaktadır. Deneyin ilk 100 saniyelik bölümünde gözlenen sürtünme katsayısı artışı ve dalgalanmalar, numuneler ile Al_2O_3 karşı yüzeyin mikro pürüzlerinin göreceli teması sonucu kırılıp ezilmesiyle oluşan aşınma parçacıklarının, sürtünen yüzeyler arasında sıkışarak geçici düzensizlikler yaratmasından ileri geldiği düşünülmektedir (Khonsari vd., 2021). Numunelere ait ortalama sürtünme katsayısı değerleri Tablo 3'te verilmiştir.



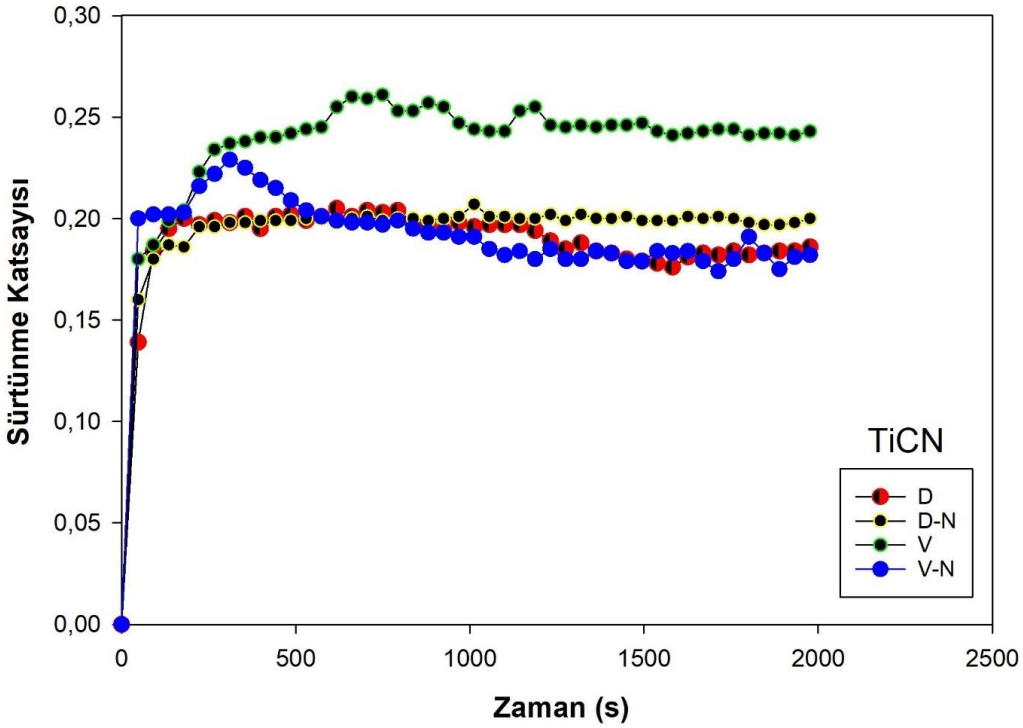
Şekil 64. Taban malzemeler, işlemsiz ve Nitrürlenmiş, numunelerin sürtünme katsayısının grafiği



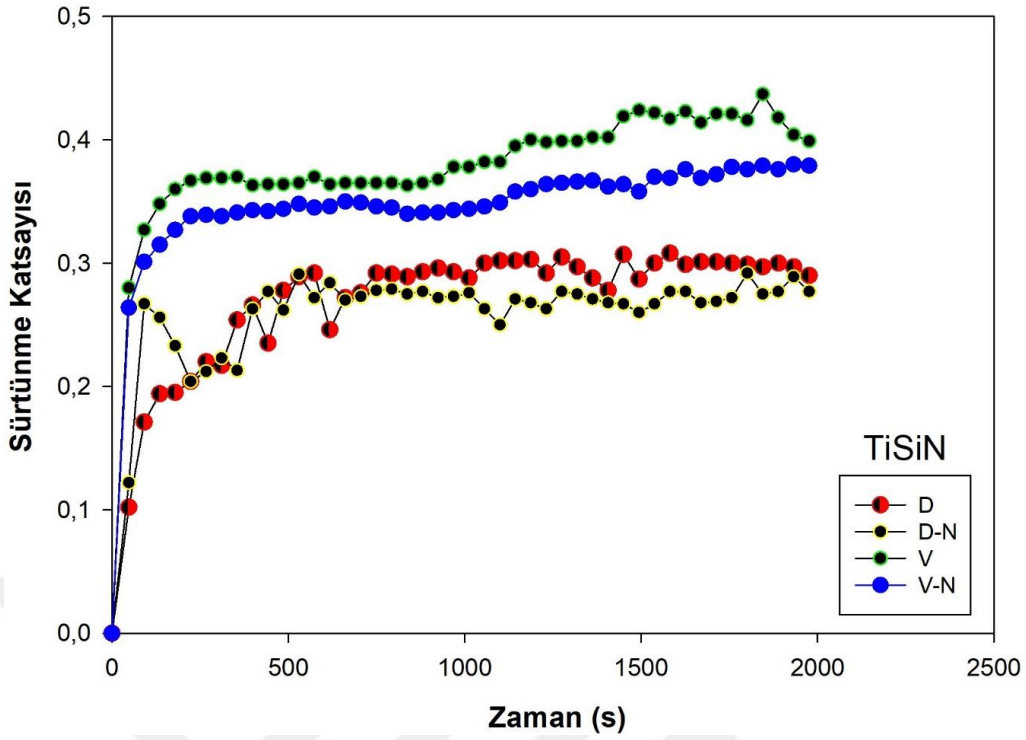
Şekil 65. TiN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği



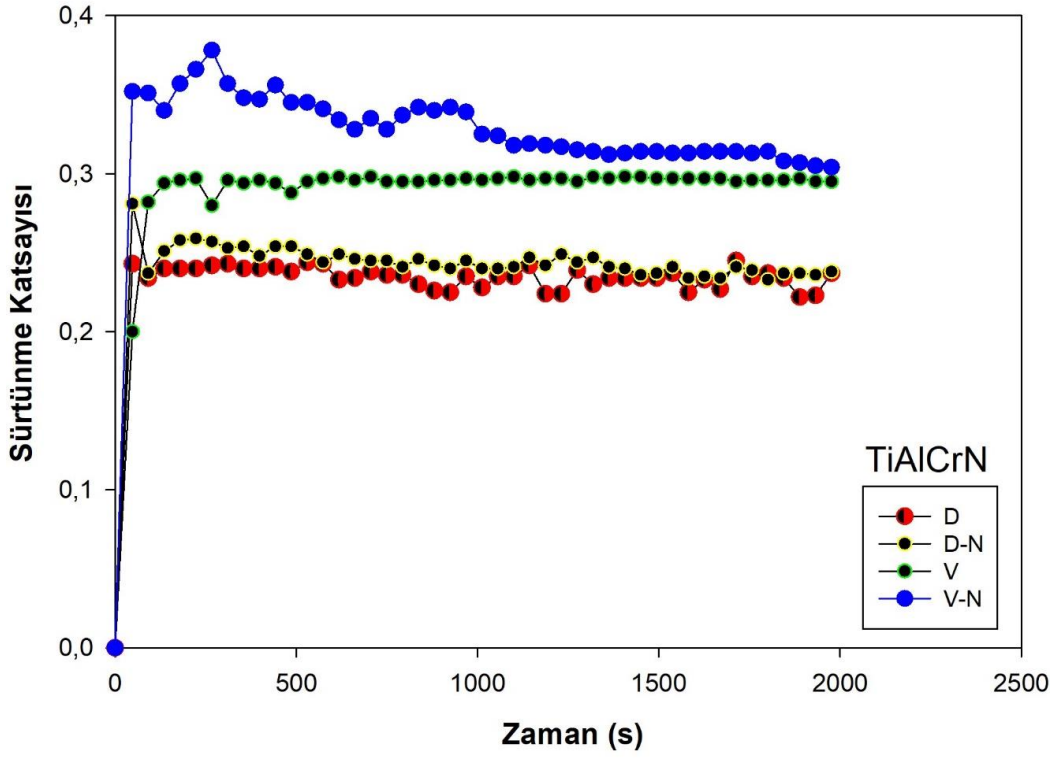
Şekil 66. TiAlN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği



Şekil 67. TiCN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği



Şekil 68. TiSiN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği



Şekil 69. TiAlCrN ile kaplanmış olan numunelerin sürtünme katsayısının grafiği

Tablo 3. Numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri

Numune	**D**	**D-N**	**V 23**	**V-N**	**D-TiN**	**D-N-TiN**	**V-TiN**	**V-N-TiN**
Sürtünme Katsayısı	0,23	0,24	0,29	0,33	0,30	0,30	0,30	0,32
Numune	**D-TiAlN**	**D-N-TiAlN**	**V-TiAlN**	**V-N-TiAlN**	**D-TiCN**	**D-N-TiCN**	**V-TiCN**	**V-N-TiCN**
Sürtünme Katsayısı	0,30	0,24	0,36	0,27	0,19	0,20	0,23	0,19
Numune	**D-TiSiN**	**D-N-TiSiN**	**V-TiSiN**	**V-N-TiSiN**	**D-TiAlCrN**	**D-N-TiAlCrN**	**V-TiAlCrN**	**V-N-TiAlCrN**
Sürtünme Katsayısı	0,27	0,26	0,38	0,35	0,23	0,24	0,29	0,33

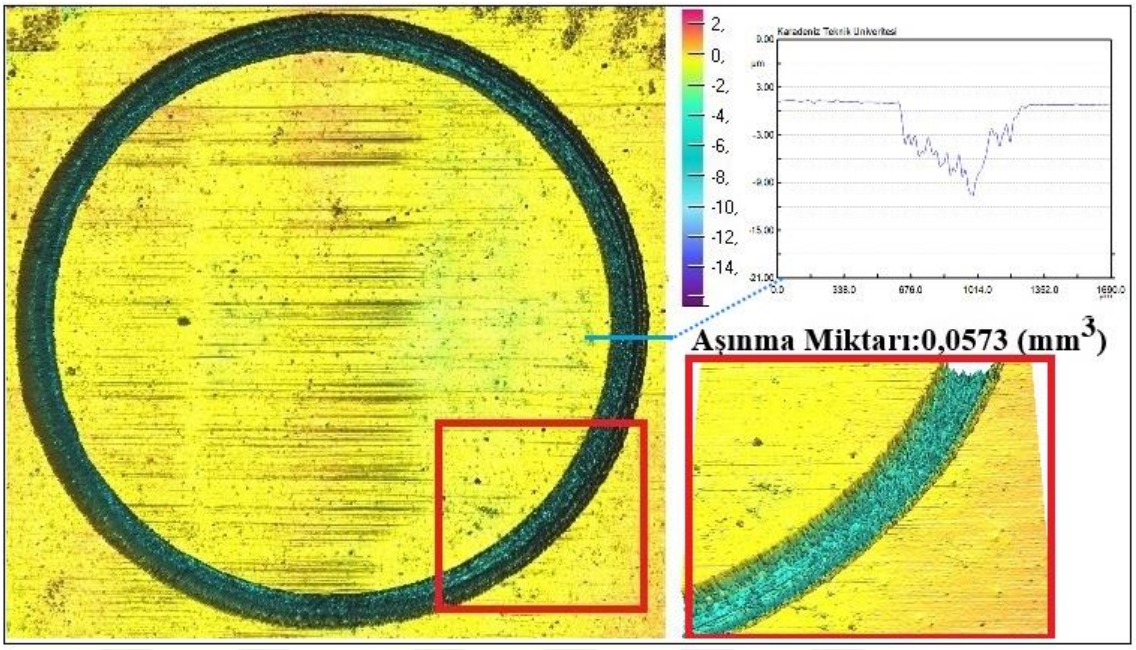
Sürtünme katsayısı (μ), kaplamaların yüzey morfolojisi, sertliği, kimyasal bileşimi ve karşı yüzeyle etkileşim davranışına bağlı olarak değişmektedir. Aynı test koşullarında dahi, kaplamanın yüzey pürüzlülüğü, damlacık yoğunluğu, sertlik, oksit film veya transfer tabakası oluşumu, sürtünme katsayısındaki artış veya azalışta belirleyici rol oynamaktadır. Ortalama sürtünme katsayısı, Dievar-N numunesi için yaklaşık 0,24, Vanadis 23-N numunesi için ise 0,33 olarak belirlenmiştir. Genel olarak üretilen kaplamaların sürtünme katsayısı değerleri yaklaşık 0,19 ile 0,38 arasında değişmektedir. Bu aralık, kaplama bileşimi, taban malzeme özellikleri ve kaplamanın yapısal karakteristikleri arasındaki etkileşimle ilişkilidir. En düşük sürtünme katsayısı değerleri TiCN kaplamalarda elde edilmiştir: D-TiCN (μ = 0,19), V-N-TiCN (μ = 0,193) ve D-N-TiCN (μ = 0,196). TiCN kaplamaların grafit benzeri karbon içeriği, doğal bir katı yağlayıcı etki oluşturarak kayma direncini azaltmakta ve sürtünme katsayısının çoğu durumda 0,20'nin altına düşmesini sağlamaktadır (V-TiCN hariç) (Figueiredo, 2011). Bu grup içinde D-TiCN numunesi, μ ≈ 0,19 ile en akıcı kayma davranışını göstermiştir. TiCN grubu içinde D-TiCN, 0,19 ile en akıcı kayma performansını sunarken, V-N-TiCN'nin 0,193 ile yakın bir değer göstermesine rağmen daha yüksek adezyon (67,3 N) ve daha düşük pürüzlülük (Ra = 0,521 μm) ile dengeli bir alternatif oluşturduğu görülmüştür. Bu verinin, diğer tüm değerlerin ortalamasının altında kalması TiCN kaplamalarının tribolojik üstünlüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Buna karşılık, TiSiN kaplamalarda en yüksek sürtünme katsayısı değerleri kaydedilmiştir: V-TiSiN (μ = 0,3813) ve V-N-TiSiN (μ = 0,3482). Bu artış, nispeten yüksek yüzey pürüzlülüğünün (Ra = 0,24-0,214 μm) ve kalınlığın sınırlı olması (1,40-1,50 μm) ile ilişkilendirilebilir. Aynı bileşimde Dievar çeliğinde, D-TiSiN (μ = 0,27) ve D-N-TiSiN (μ =

0,26), daha düşük pürüzlülük (Ra = 0,15-0,14 µm) ve daha yüksek kalınlık sayesinde TiSiN grubunun ortalamasının altında kalarak daha duşuk sürtünme katsayısını göstermektedir. TiAlN kaplamasında ise V-TiAlN (µ = 0,36) en yüksek sürtünme katsayısını gösterirken, D-N-TiAlN (µ = 0,24) düşük pürüzlülük (Ra = 0,16 µm) ve iyi adezyon (74,9 N) ile TiAlN grubu içinde en dengeli sürtünme davranışını sergilemiştir. TiAlCrN'de D-TiAlCrN (µ = 0,23) ve D-N-TiAlCrN (µ = 0,24), yüksek sertlik (53,92-54,12 GPa) ve kalınlık (4,20-4,66 µm) ile düşük sürtünme sağlarken, V-N-TiAlCrN (µ = 0,33) yüksek pürüzlülük (Ra = 0,45 µm) ve düşük kalınlık (1,19 µm) nedeniyle TiAlCrN grubu ortalamasının (µ ≈ 0,27) oldukça üzerinde kalmaktadır. TiN grubu ise tüm örneklerde (µ = 0,2992-0,3209) orta-yüksek sürtünme göstererek diğer bileşimlere göre daha sınırlı bir performans sunmaktadır.

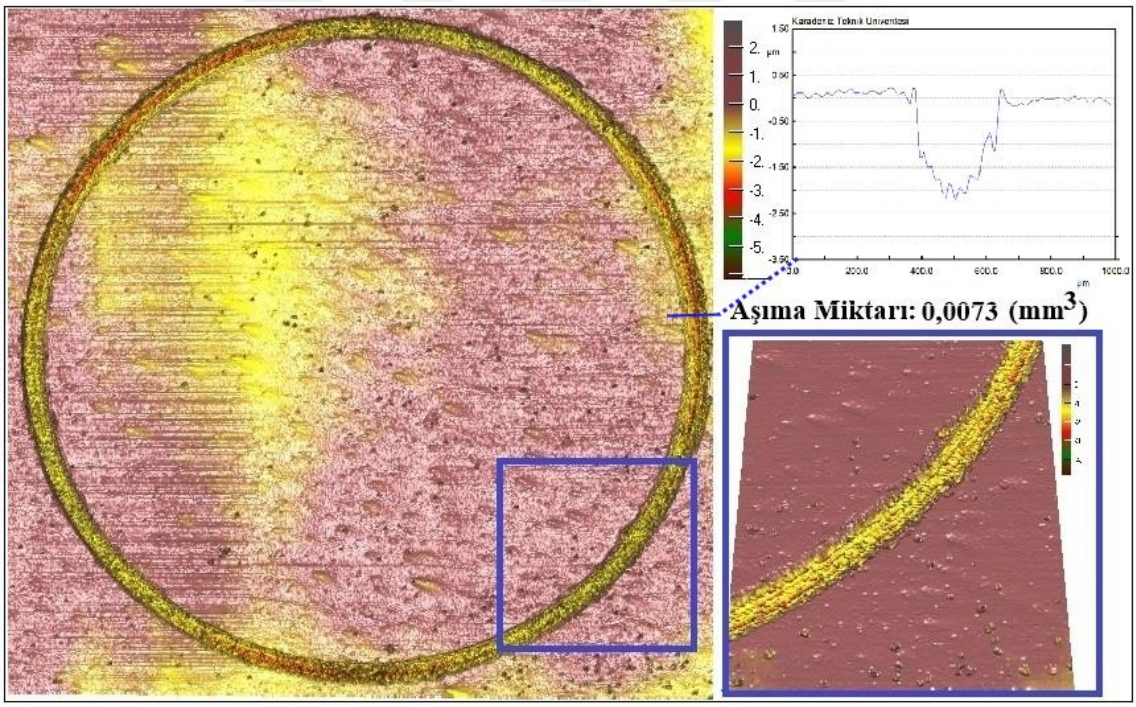
Genel olarak, sürtünme katsayısının düşük olması için yüksek sertlik, iyi adezyon ve düşük pürüzlülük kombinasyonu kritik öneme sahiptir. Örneğin, D-TiCN'de Ra = 0,57 µm gibi yüksek bir değere rağmen µ = 0,19 ile tüm örnekler arasında en düşük seviyede kalmıştır; nedeni ise 48,02 GPa sertlik, 79,1 N adezyon, karbon etkisi ve 5,01 µm kalınlık, pürüzlülüğün olumsuz etkisini tamamen baskılamıştır. Buna karşılık, V-TiSiN'ün sertlik değerinin daha düşük (47,97 GPa) olması ve daha düşük kalınlığa (1,40 µm) sahip olması sonucunda sürtünme katsayısının 0,38'e yükselmesine yol açmıştır.

Aşınma testlerinin yalnızca sürtünme katsayısı eğrileriyle sınırlı kalmayıp, aşınma izlerinin geometrik ve mikroyapısal özelliklerinin de ayrıntılı biçimde incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda profilometre ölçümleri aracılığıyla aşınma izlerinin derinlik, genişlik ve hacim kaybı gibi parametreleri değerlendirilmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 70'ten 93'e kadar gösterilmiştir. Bunun yanı sıra, farklı kaplamalarda elde edilen aşınma oranları, Şekil 94-100'de sunulan verilerde karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu şekiller, kaplamaların aşınma testleri altındaki performanslarını açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, SEM ve bölgesel EDS incelemeleri sayesinde aşınma yüzeylerinin morfolojisi, hasar mekanizmaları ve kaplama-taban malzeme etkileşimleri ortaya konmuş, bu bulgular ise Şekil 101'den 123'e kadar verilmiştir.

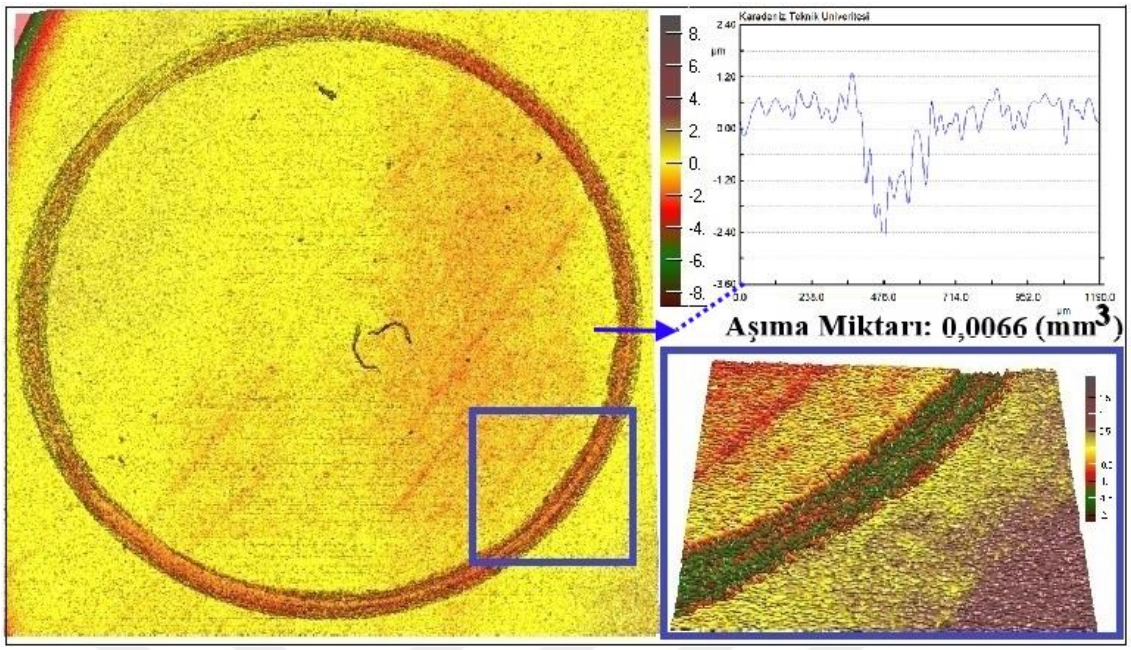
Profilometre, SEM ve EDS bulgularının birlikte incelenmesi, aşınma sürecinin hem makro-geometrik hem de mikro-yapısal düzeyde bütüncül bir anlayışla değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Böylece kaplamasız, nitrürlenmiş ve kaplamalı numunelerin davranışları yalnızca aşınma miktarı açısından değil, aynı zamanda baskın mekanizmaların niteliği bakımından da açıklığa kavuşturulmaktadır.



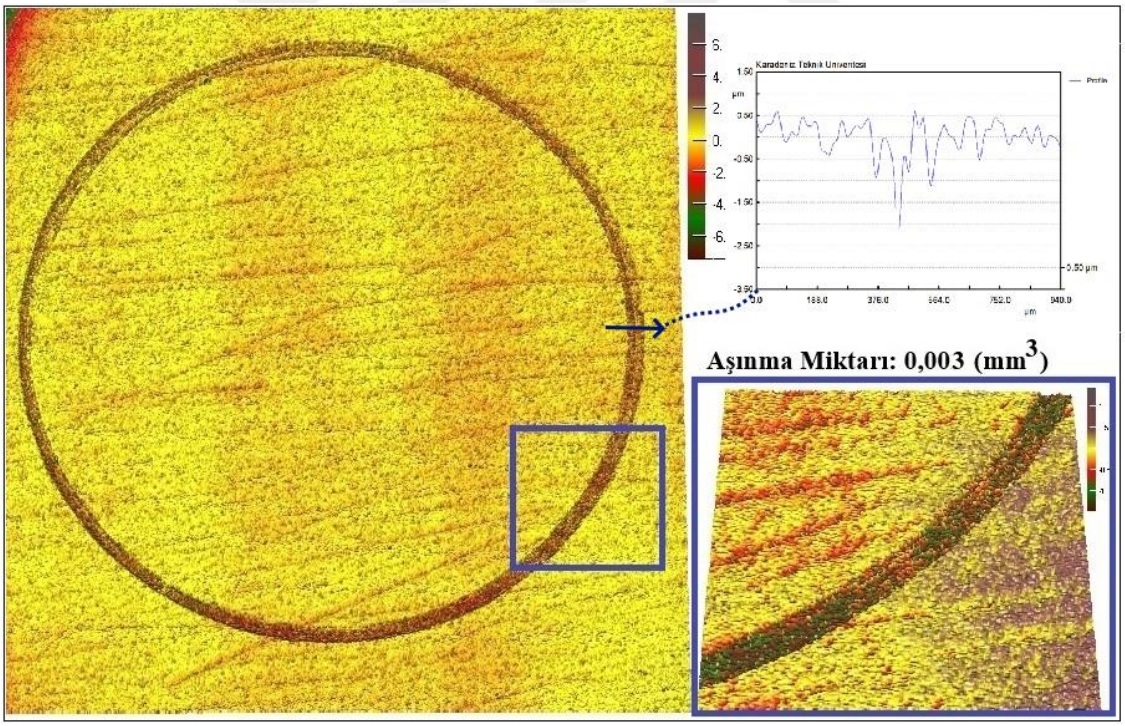
Şekil 70. İşlemsiz Dievar numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



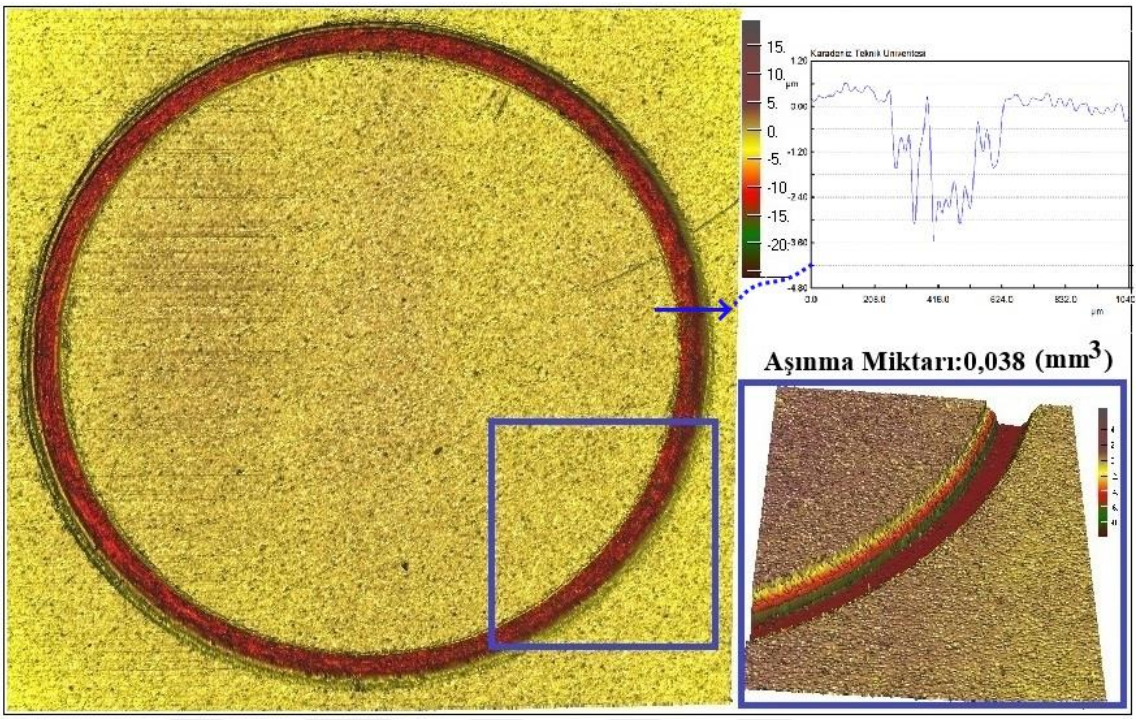
Şekil 71. Dievar-Nitrürlü numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



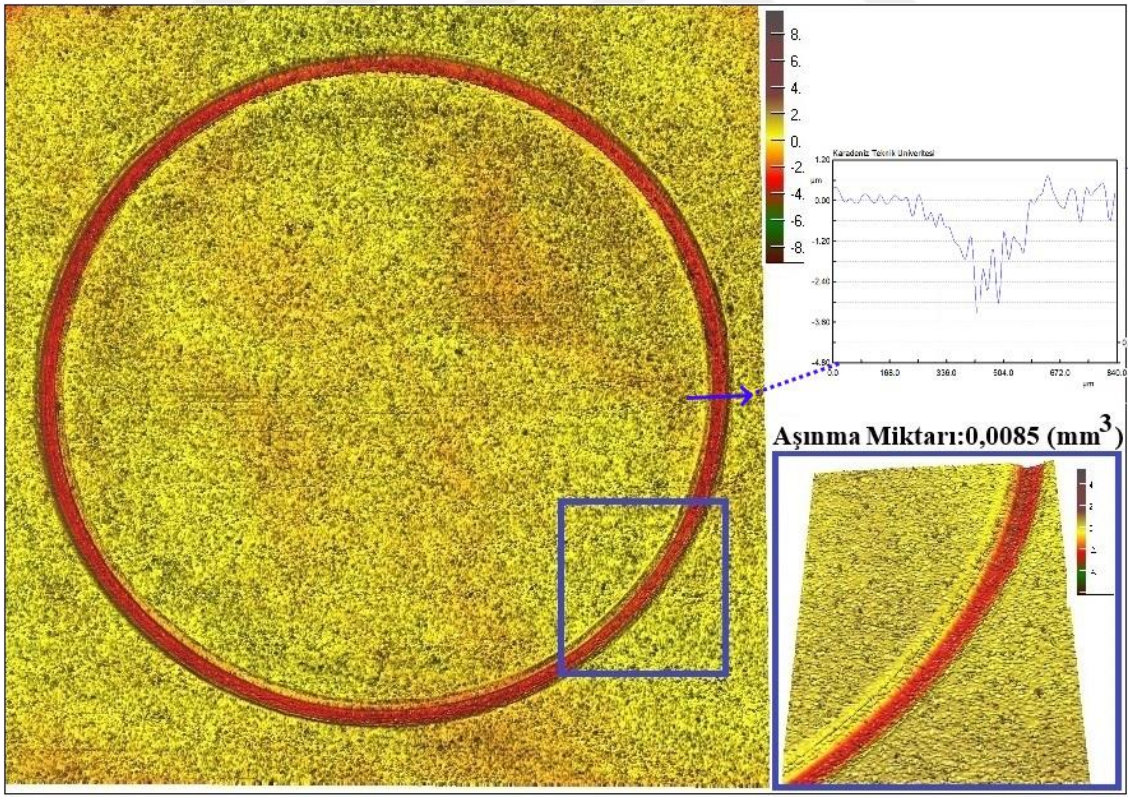
Şekil 72. İşlemsiz Vanadis23 numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



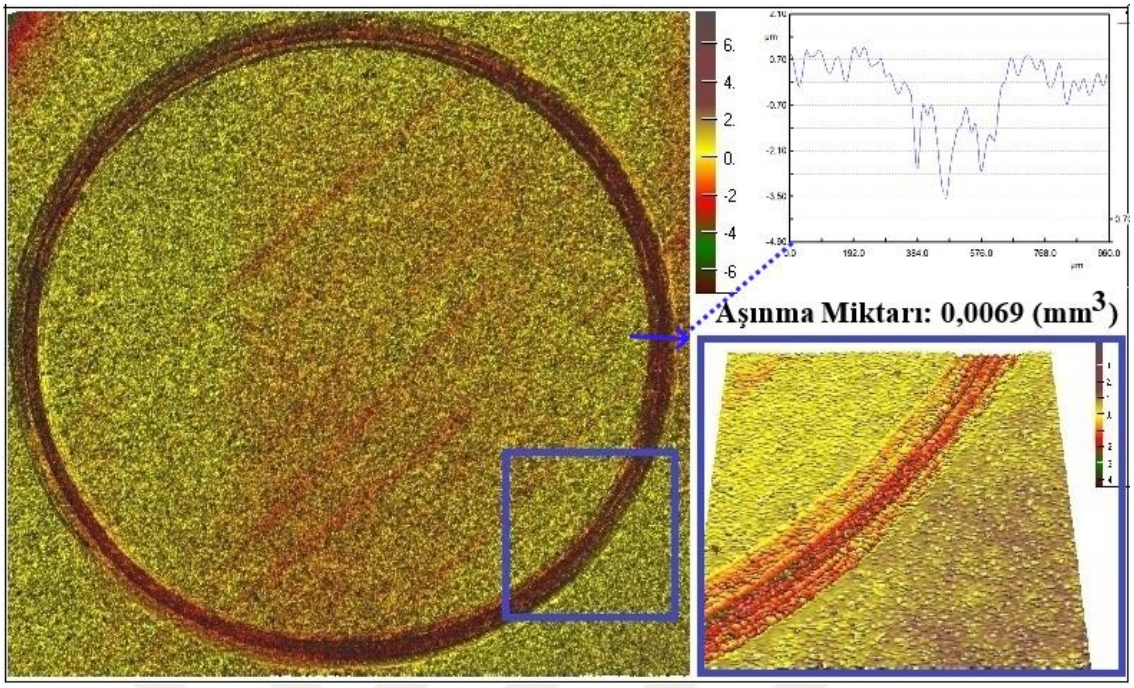
Şekil 73. Vanadis23 numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



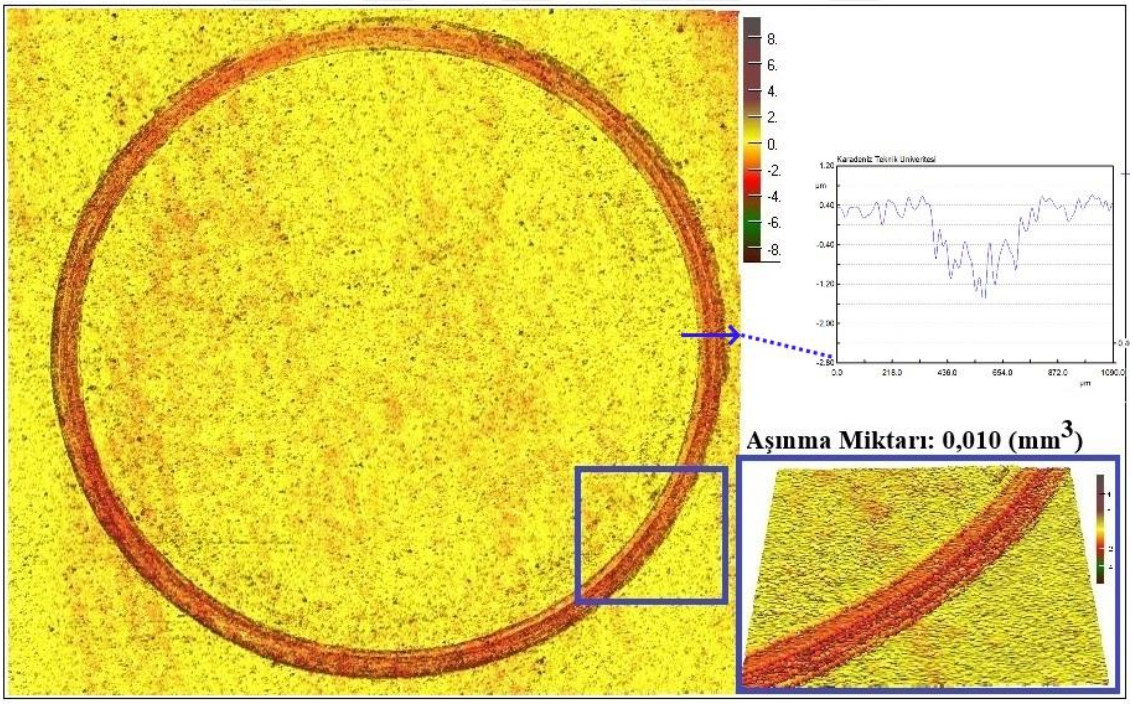
Şekil 74. D-TiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



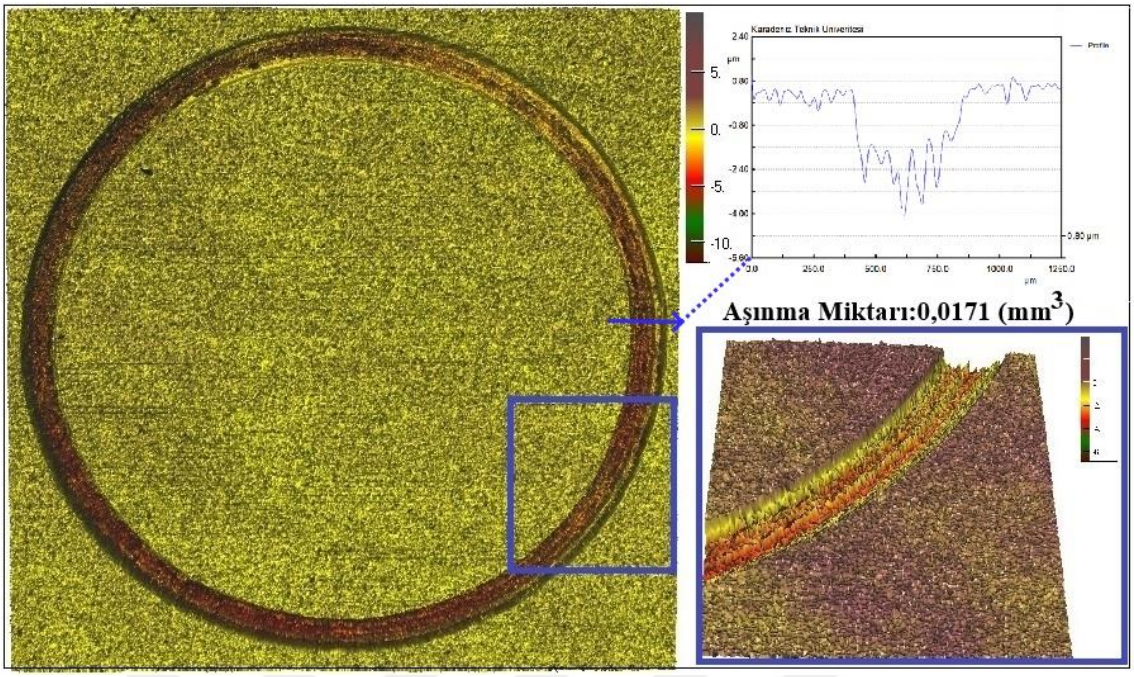
Şekil 75. D-N-TiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



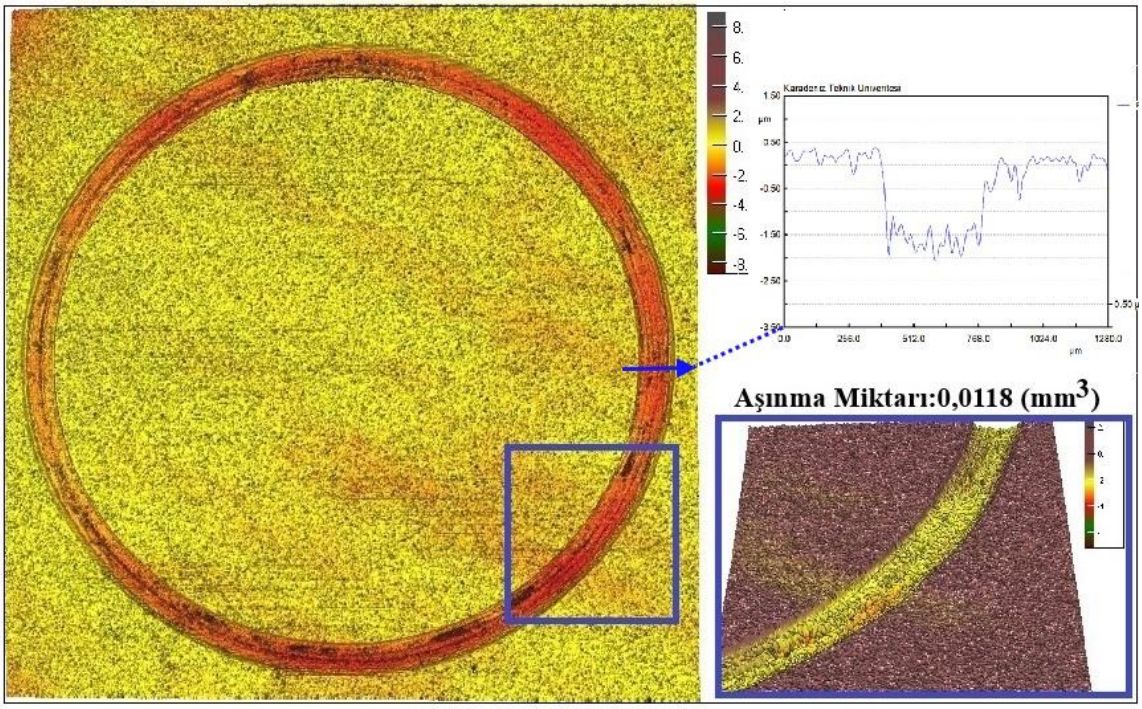
Şekil 76. V-TiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



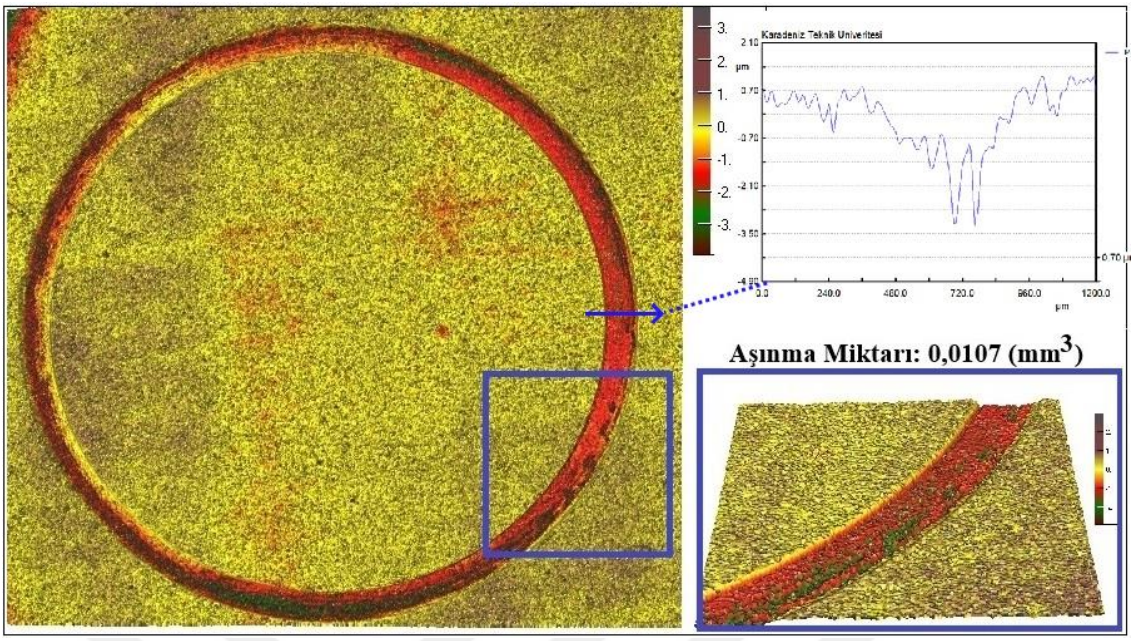
Şekil 77. V-N-TiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



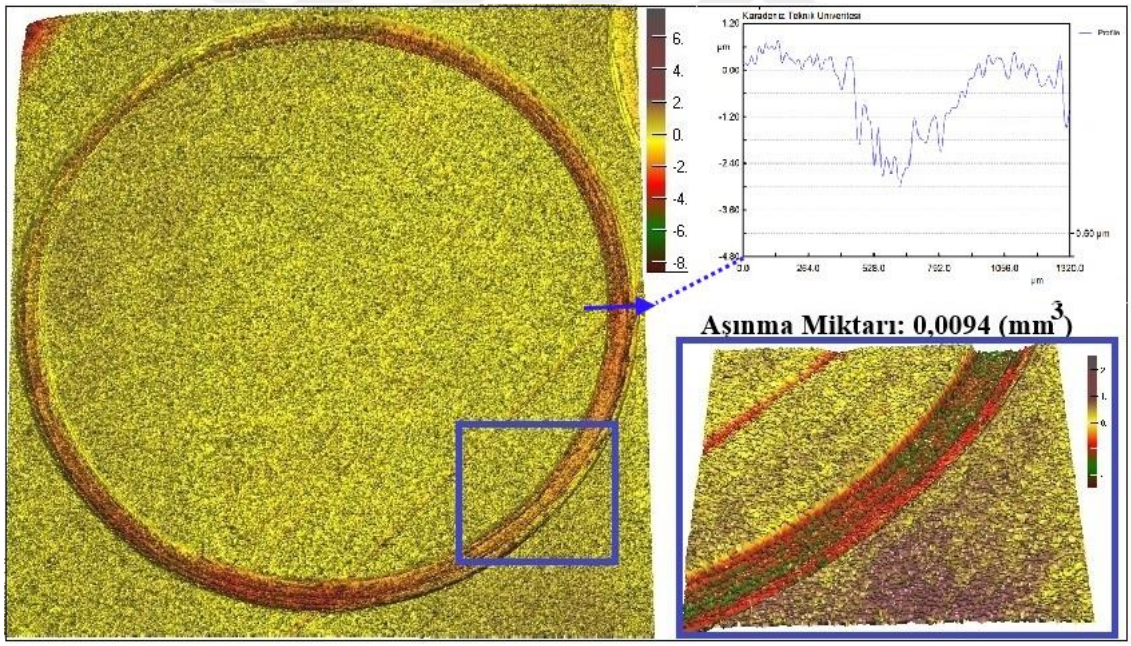
Şekil 78. D-TiAlN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



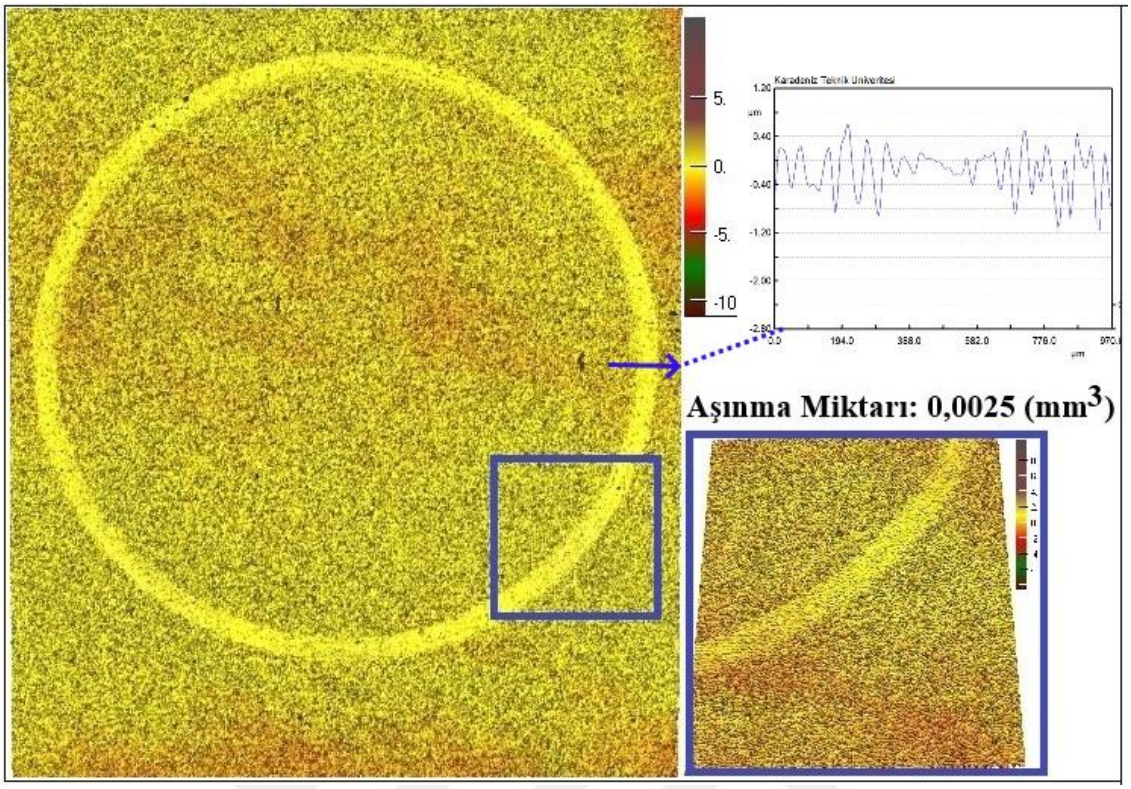
Şekil 79. D-N-TiAlN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



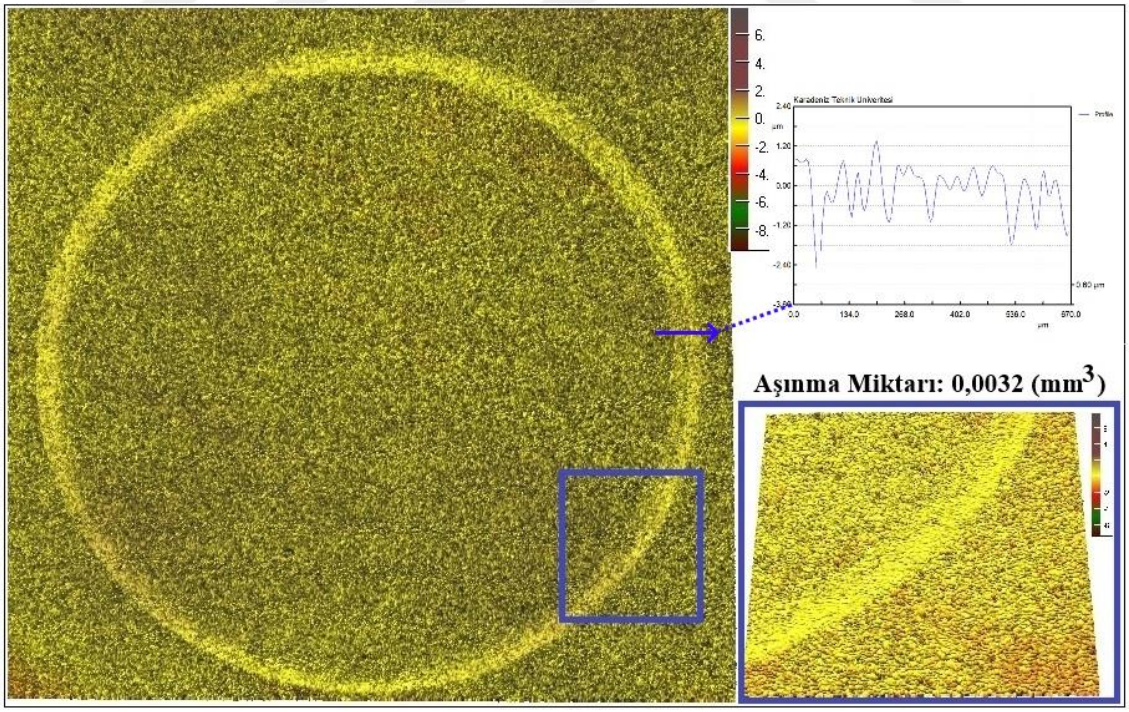
Şekil 80. V-TiAlN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



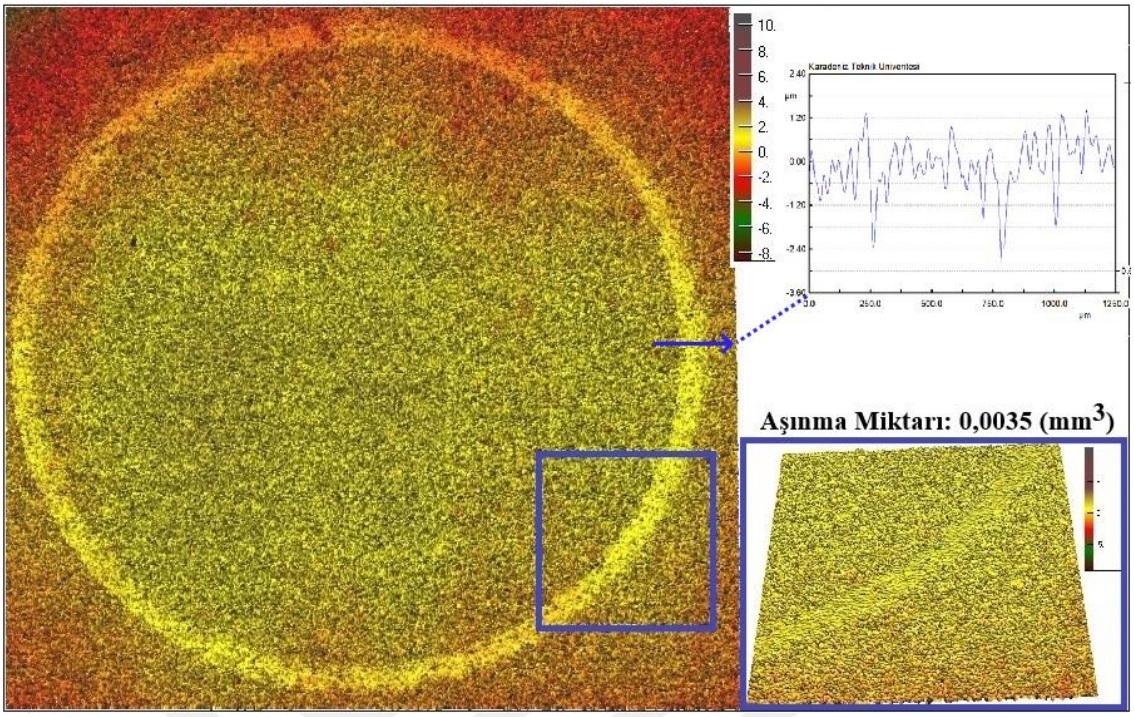
Şekil 81. V-N-TiAlN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



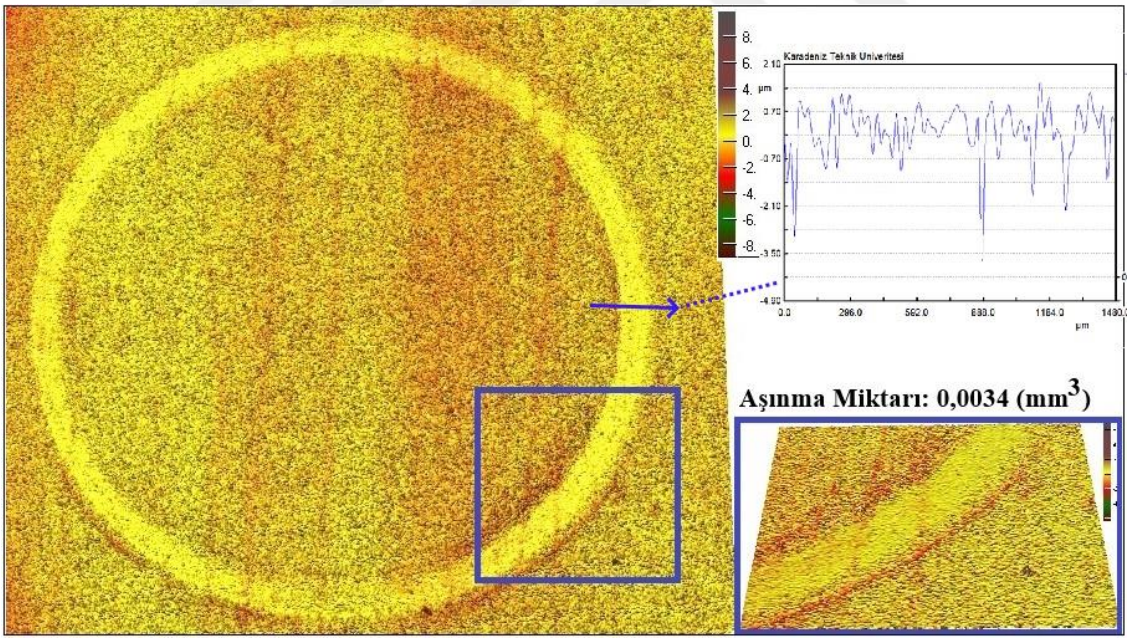
Şekil 82. D-TiCN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



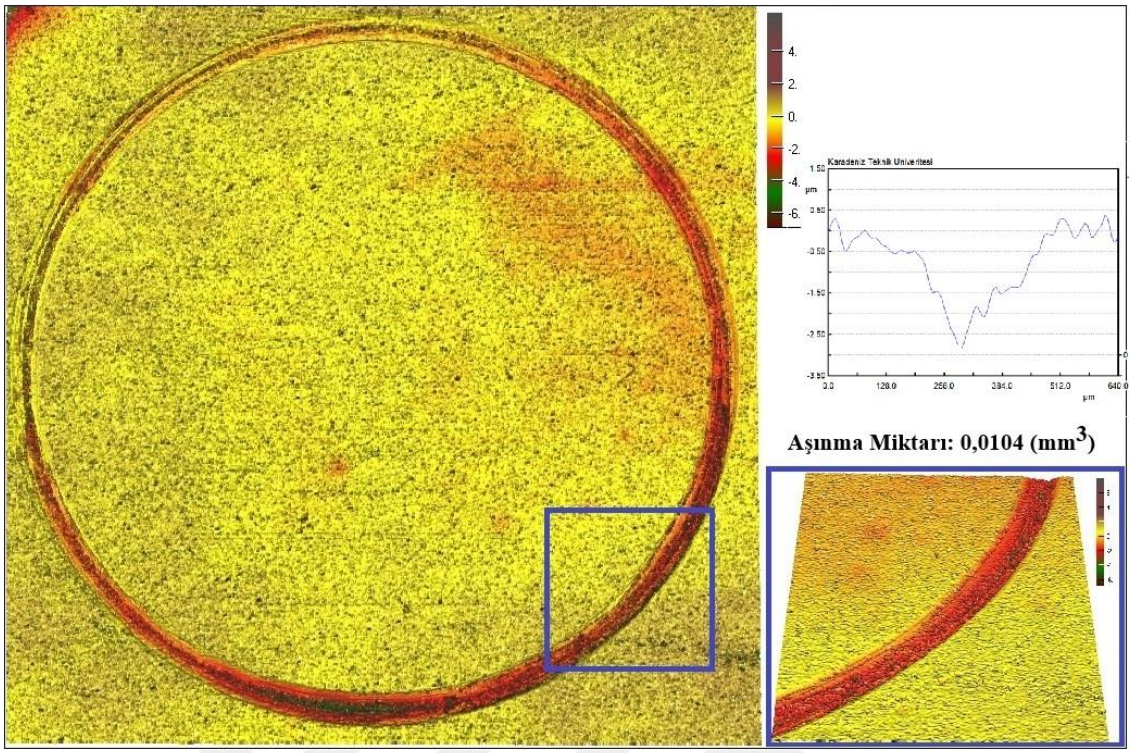
Şekil 83. D-N-TiCN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



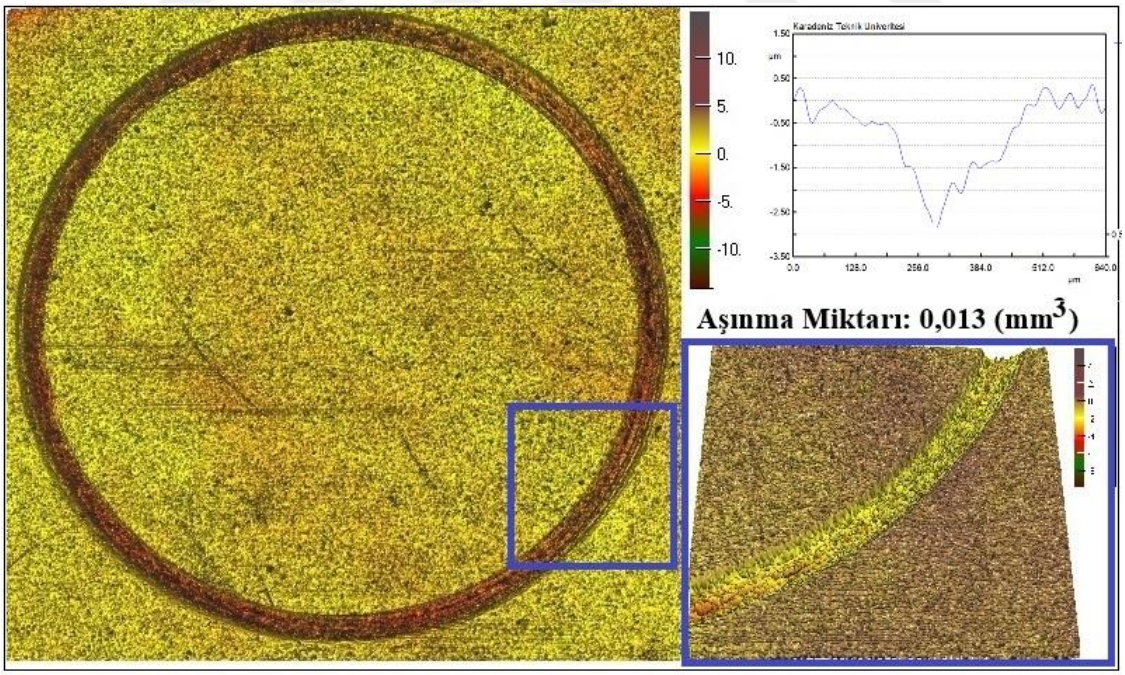
Şekil 84. V-TiCN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



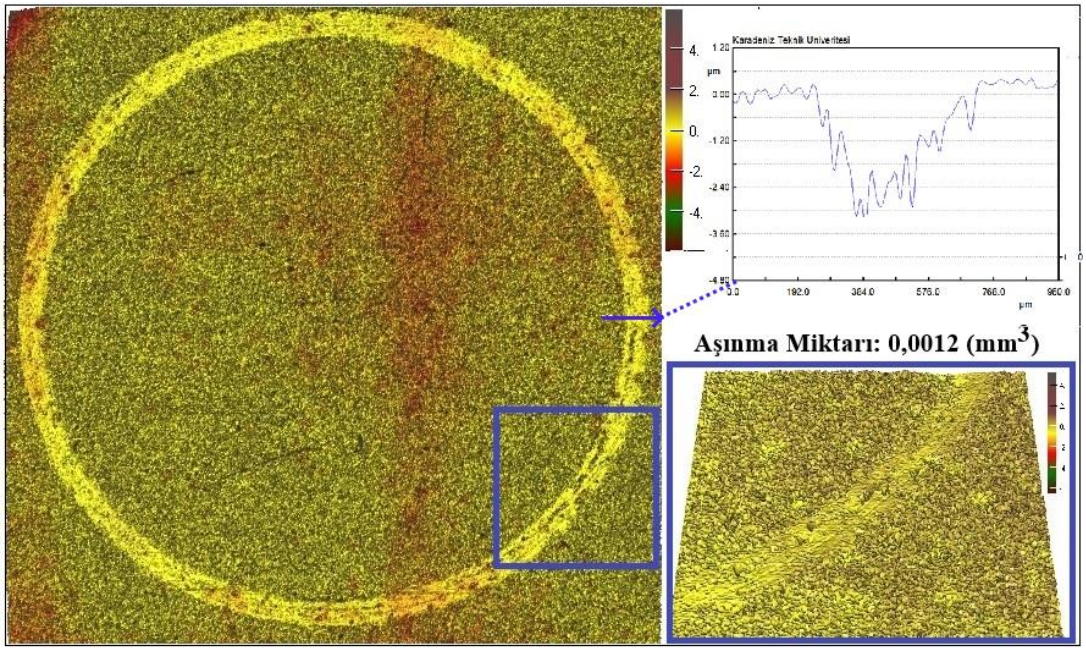
Şekil 85. V-N-TiCN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



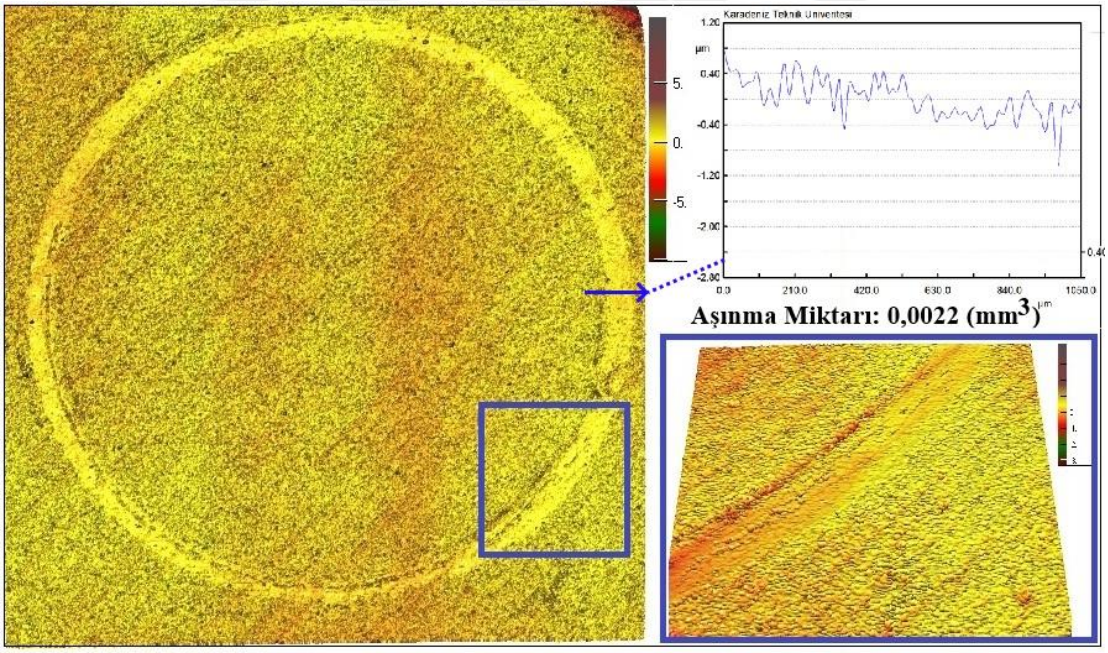
Şekil 86. D-TiSiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



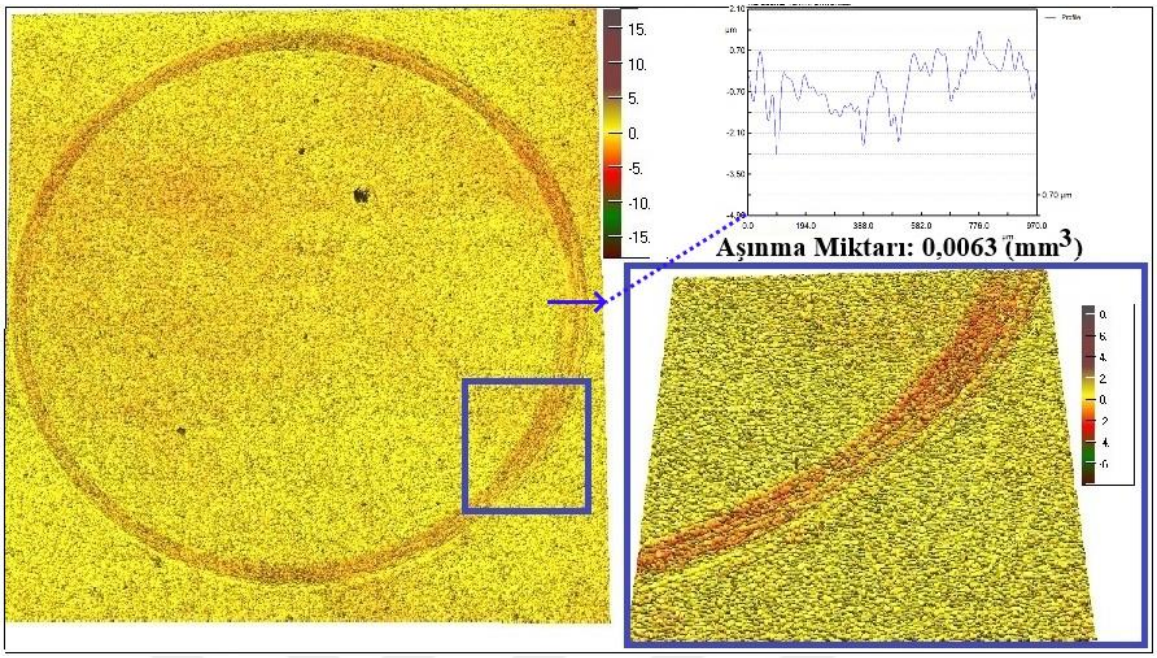
Şekil 87. D-N-TiSN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



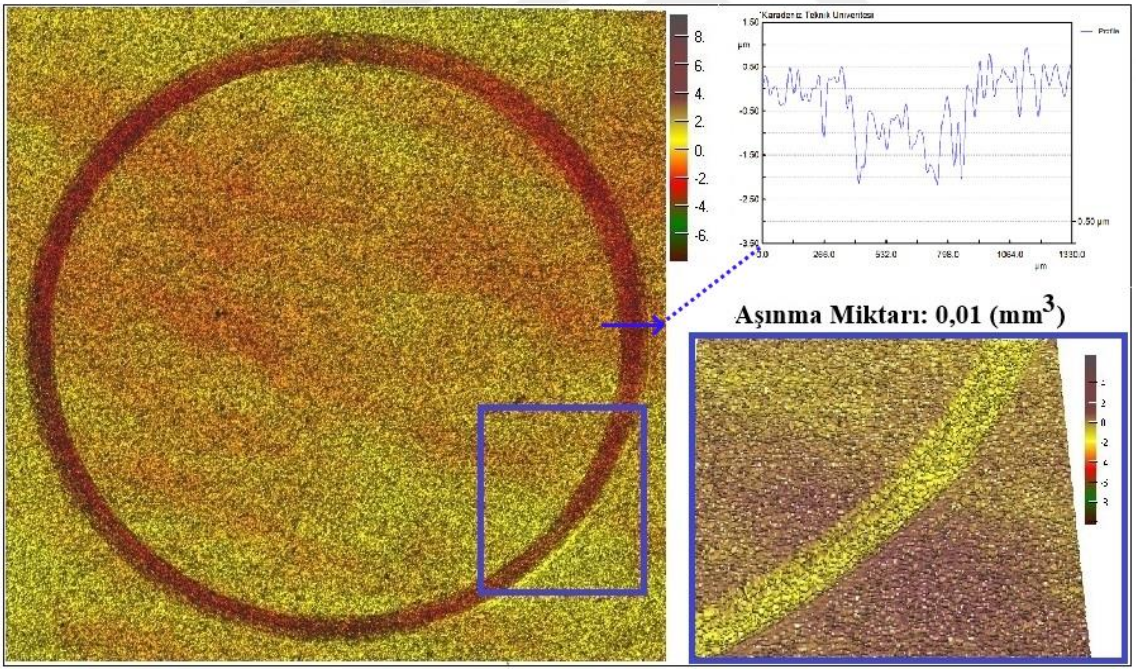
Şekil 88. V-TiSiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



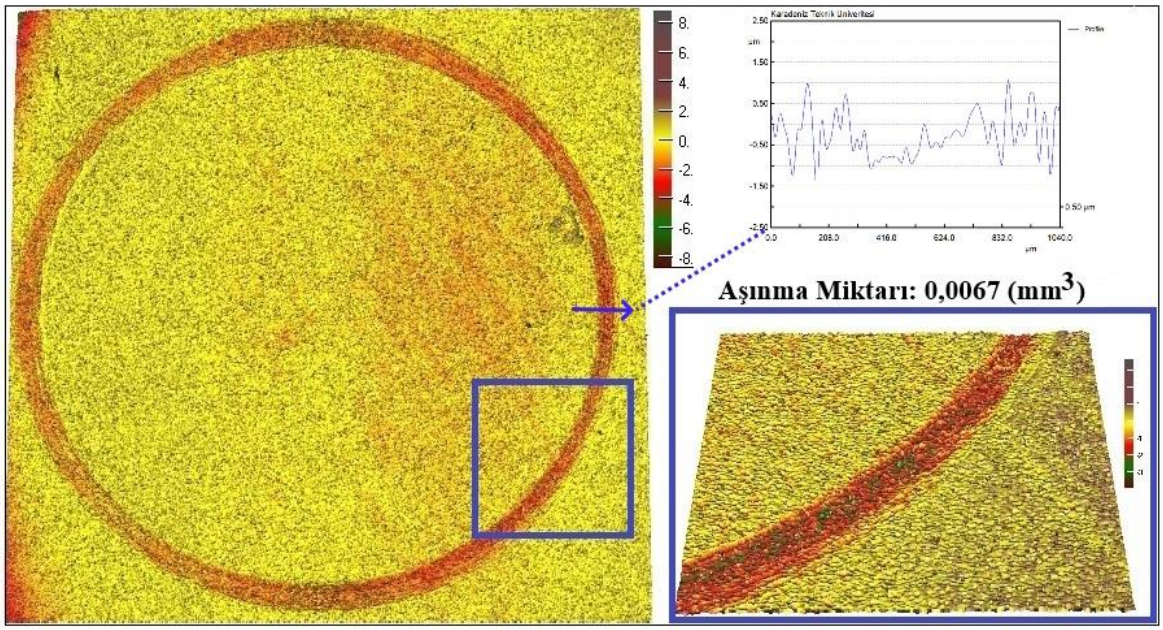
Şekil 89. V-N-TiSiN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



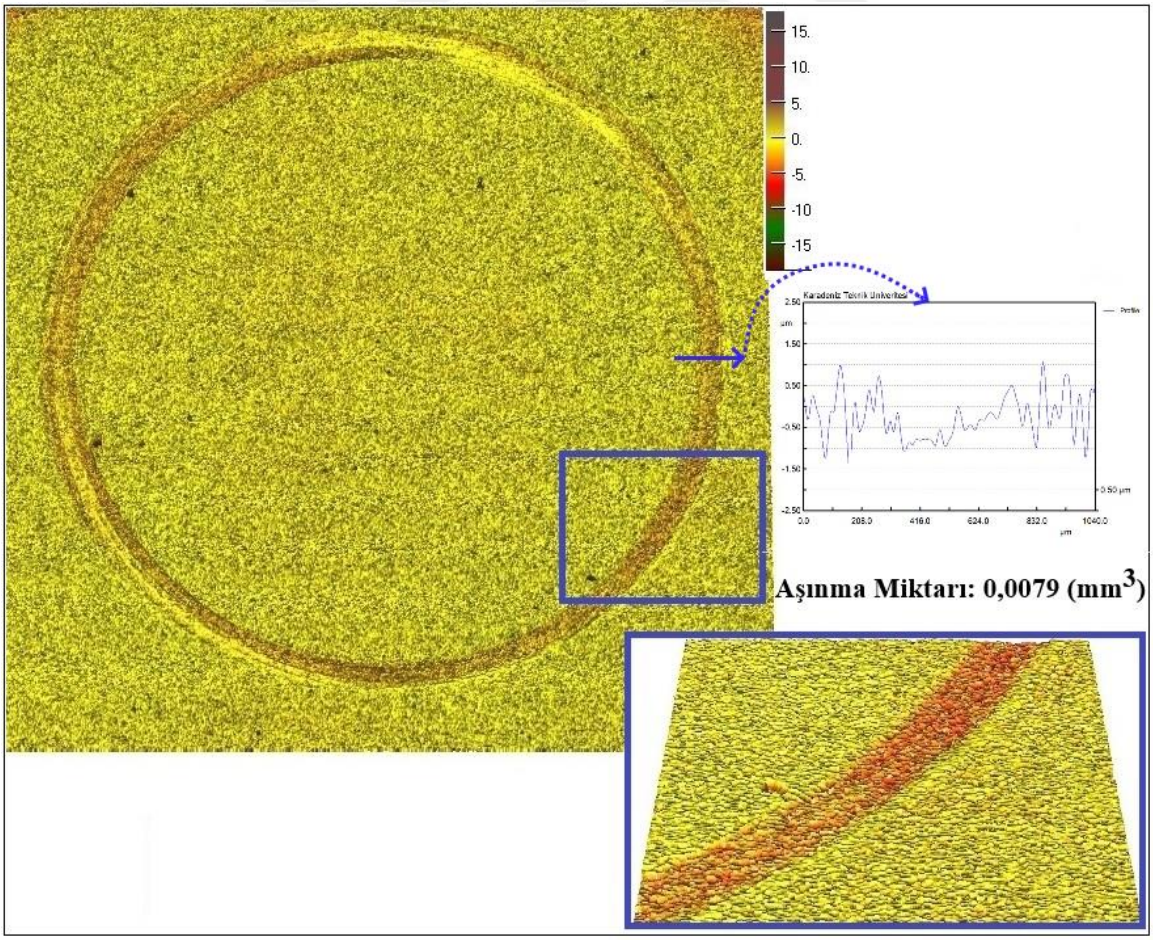
Şekil 90. D-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü



Şekil 91. D-N-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü

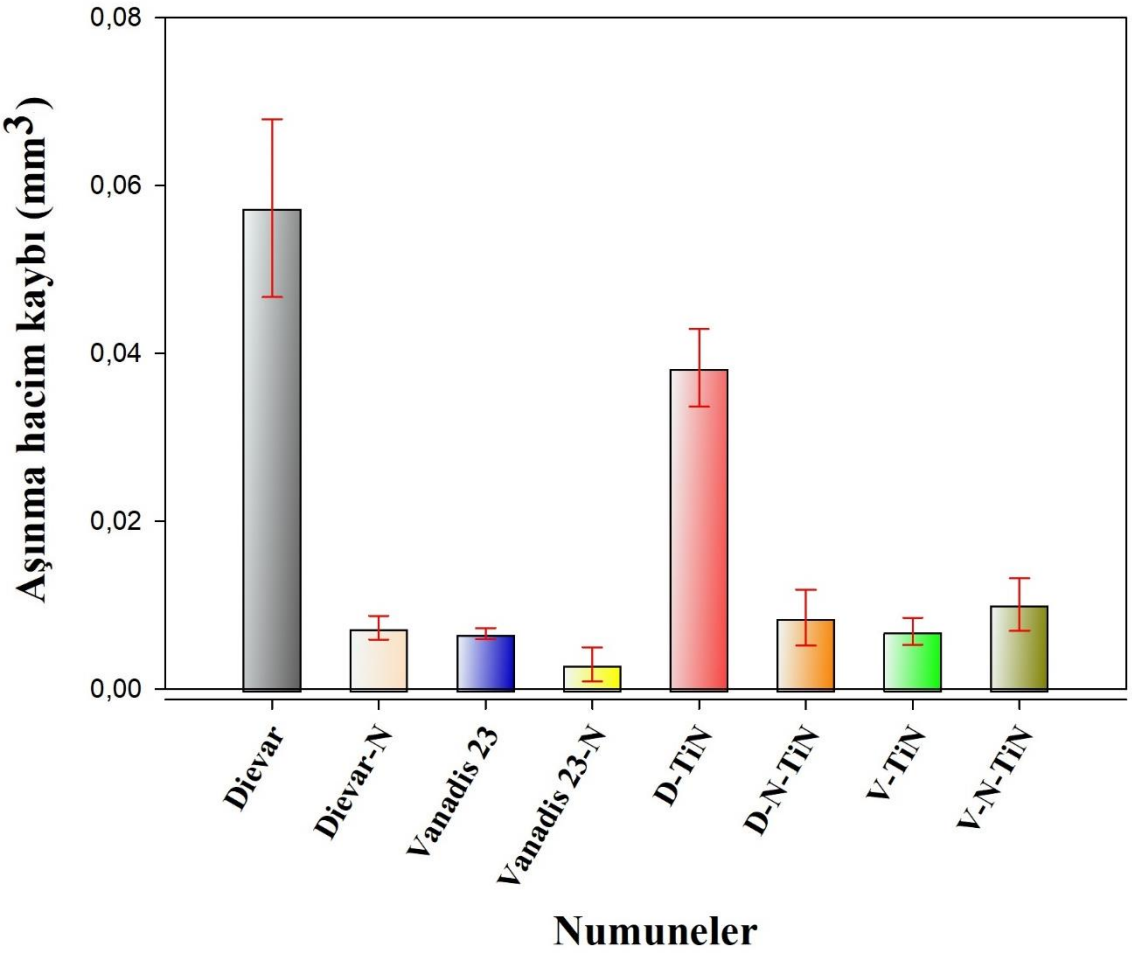


Şekil 92. V-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü

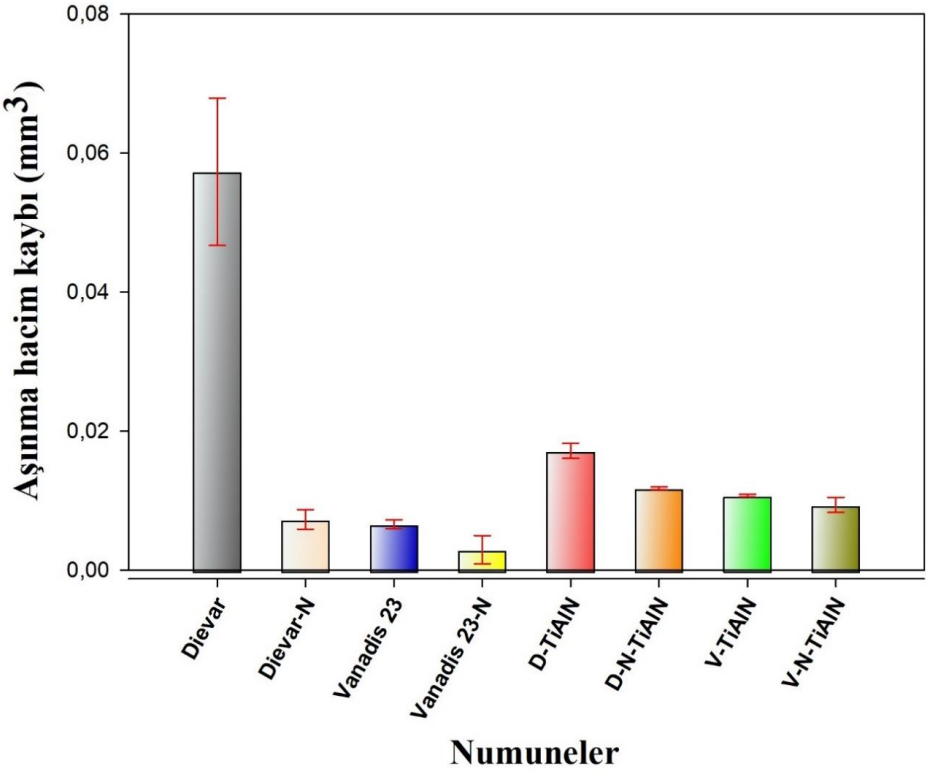


Şekil 93. V-N-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin optik profilometre görüntüsü

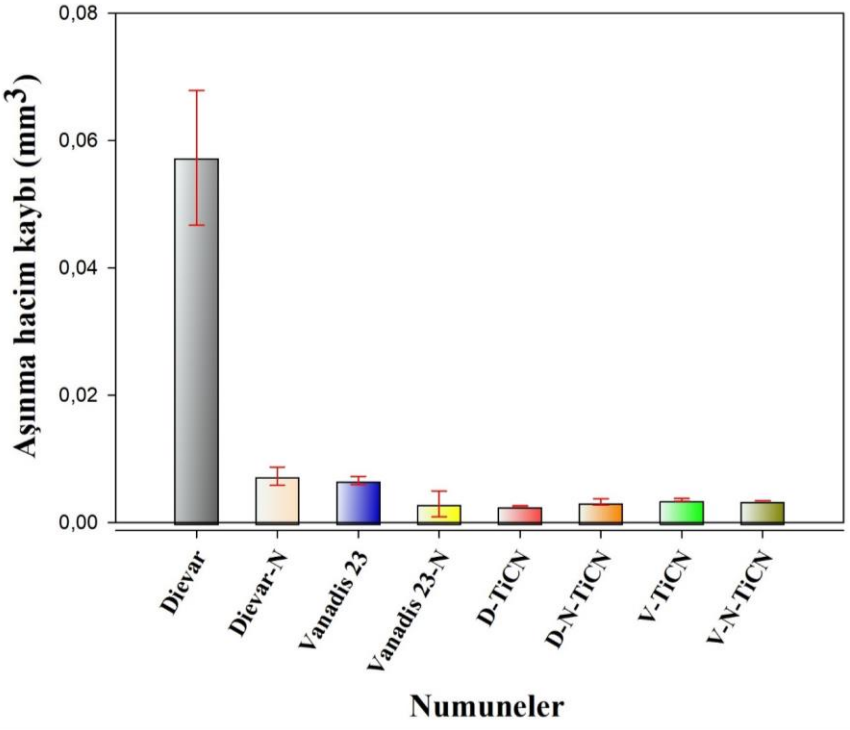
Bilye-disk testlerinden elde edilen optik profilometre görüntüleri, farklı yüzey koşullarında aşınma izlerinin derinlik ve genişlik bakımından nasıl değiştiğini açıkça ortaya koymaktadır. İşlemsiz numunelerde izler derin ve düzensiz olup hacim kaybı belirgindir. Nitrürleme sonrası yüzey topografisi daha homojen hale gelmiş, izler belirgin şekilde sığlaşmıştır. Profilometre analizlerinde elde edilen bulgulardan, yüzeylerde oluşan aşınma izlerinin derinlik ve genişlik bakımından farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Renk skalası incelendiğinde, özellikle işlemsiz Dievar numunesinde en yüksek aşınma derinliklerinin geliştiği görülmektedir. Nitrürleme ve kaplama uygulamalarıyla bu değerler belirgin şekilde azalmıştır. Kaplamalı numunelerde ise aşınma izleri daha dar ve yüzeysel kalmıştır. TiN ve TiAlN kaplamalar belirli düzeyde iyileşme sağlarken, TiCN, TiSiN ve TiAlCrN kaplamalar daha düşük derinlikli ve düzenli izlerle en yüksek koruyucu etkiyi göstermiştir.



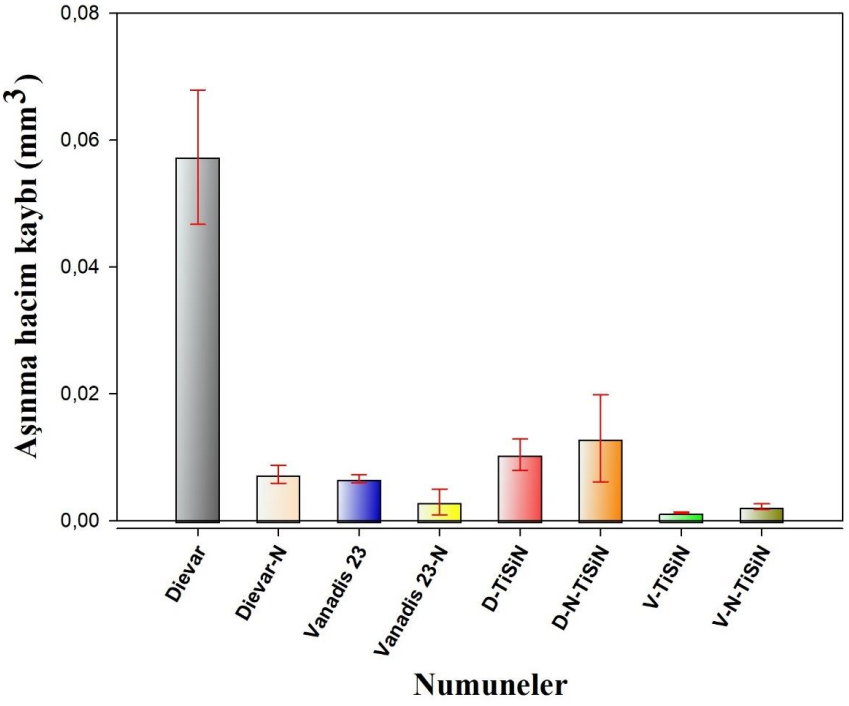
Şekil 94. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiN kaplamaların aşınma oranları



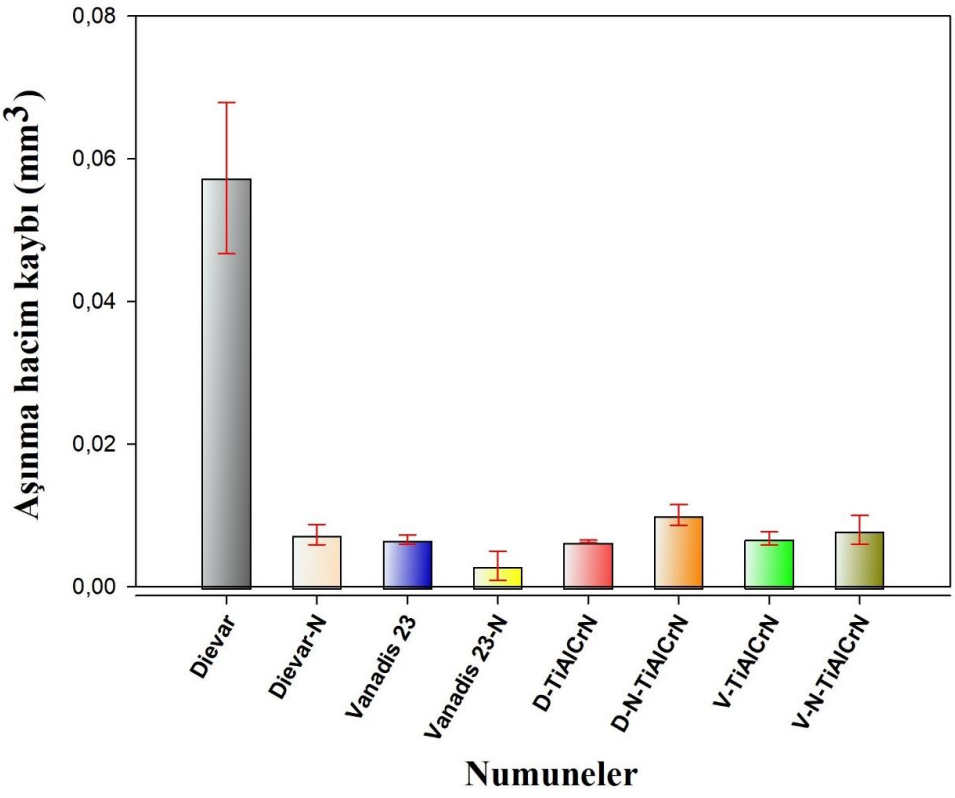
Şekil 95. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiAlN kaplamaların aşınma oranları



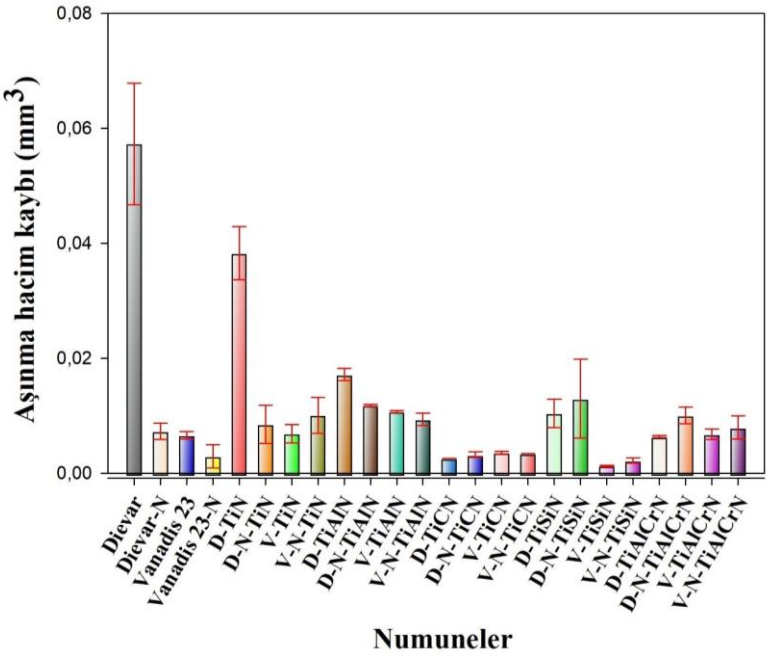
Şekil 96. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiCN kaplamaların aşınma oranları



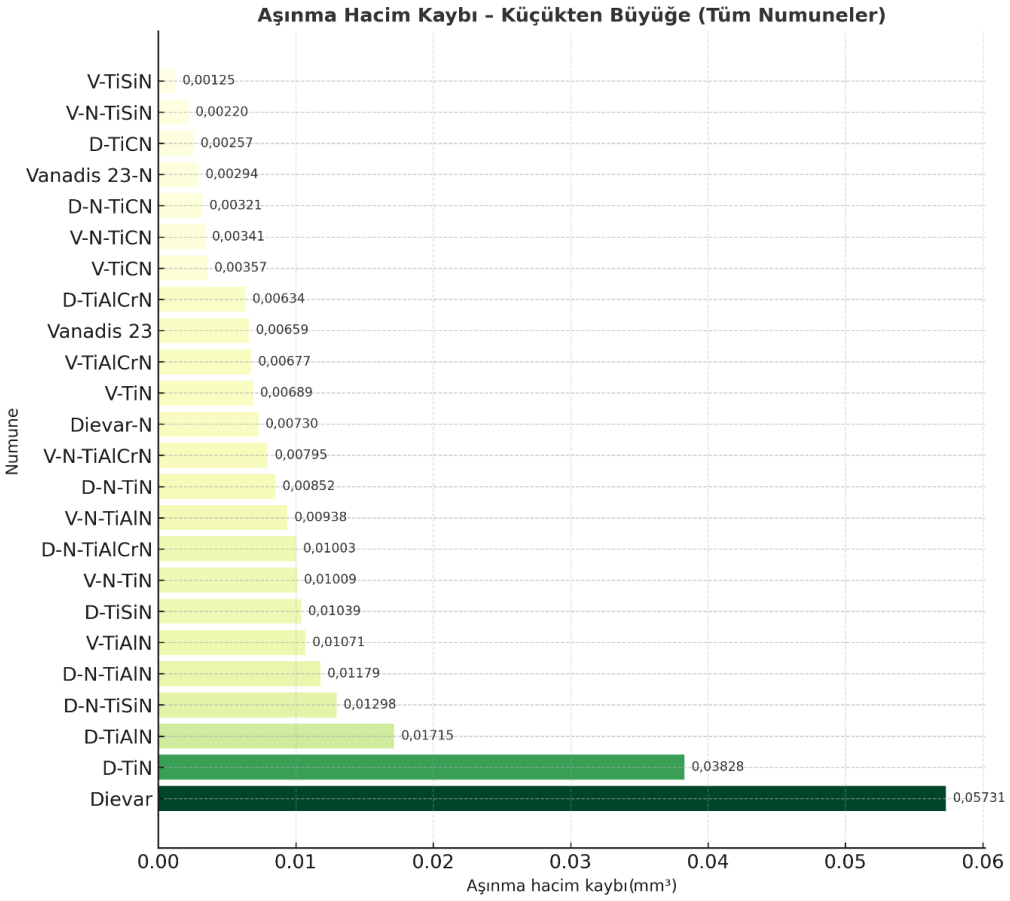
Şekil 97. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiSiN kaplamaların aşınma oranları



Şekil 98. İşlemsiz ve nitrürlenmiş taban malzemelerin ve TiAlCrN kaplamaların aşınma oranları



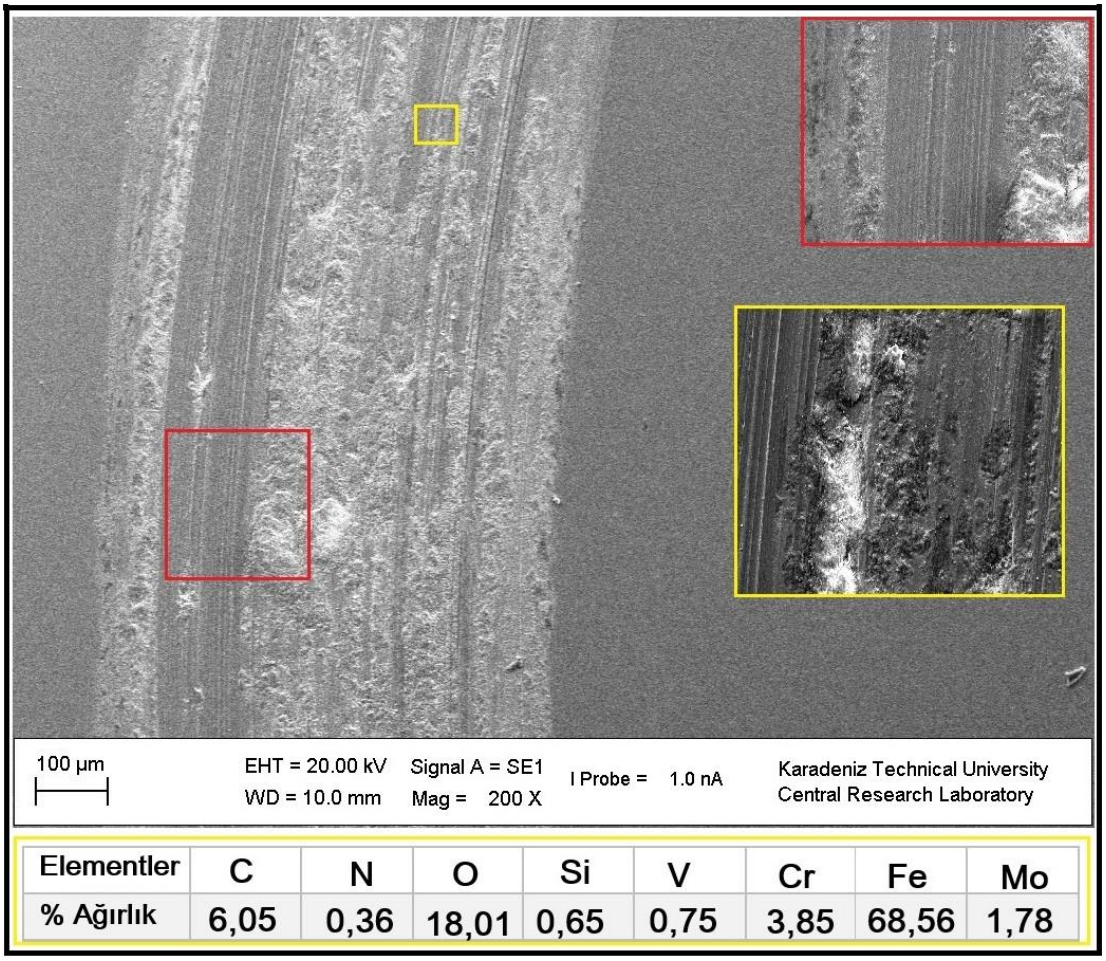
Şekil 99. Tum numunelerden elde edilen aşınma oranları



Şekil 100. Tum numunelerden elde edilen aşınma oranları

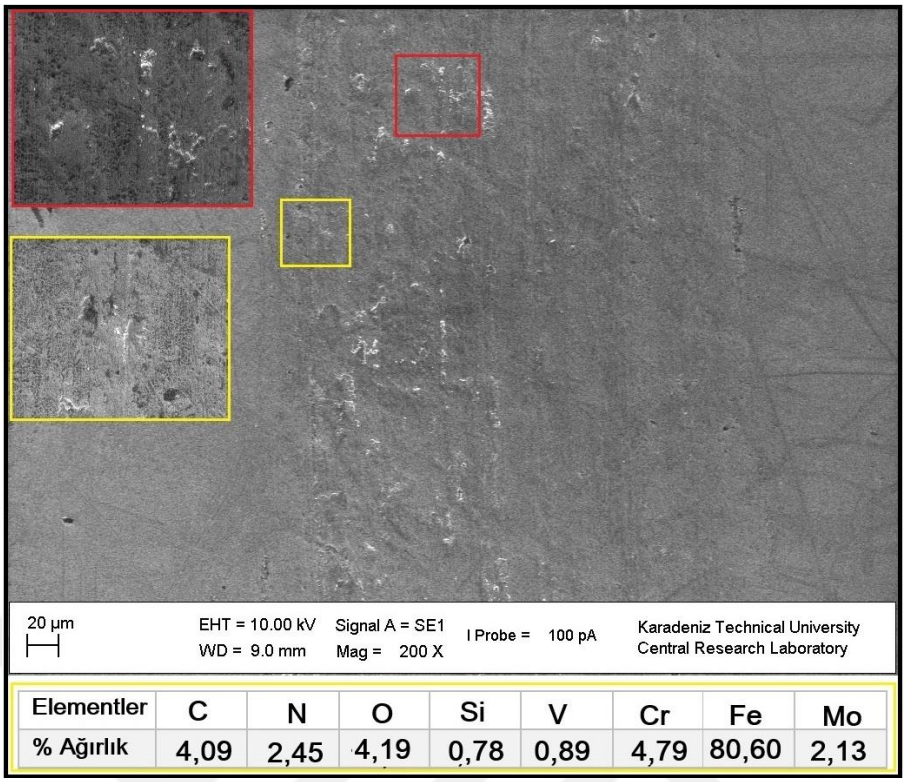
Şekil 94'ten 100'e kadar verilen sonuçlar, numunelerin aşınma hacim kaybı değerleri, $1{,}25\times10^{-3}$ mm³ (V-TiSiN) ile 0,0573 mm³ (kaplamasız Dievar) arasında değişim göstermekte olup, bu fark kaplama bileşimi, taban malzemesi, nano sertlik, kaplama kalınlığı, adezyon dayanımı, yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve sürtünme katsayısının (μ) etkileşimiyle ilişkilidir. En düşük aşınma hacim kayıpları, TiCN kaplamalarda gözlenmiştir: D-TiCN, D-N-TiCN ve V-N-TiCN. Bu gösterilen aşınma direnci, yüksek nano sertlik (48,02-49,50 GPa), kalın kaplama yapısı (4,59-5,10 μm), düşük sürtünme katsayısı ($\mu \approx$ 0,19-0,196) ve TiCN'nin grafit benzeri karbon içeriğinin doğal yağlayıcı etkisiyle açıklanabilir. Literatürde belirtildiği üzere, temas sırasında yüzeylerden ayrılan karbon bileşenleri, karşı yüzeyde bir transfer filmi oluşturarak katı yağlayıcı bir tabaka meydana getirir. Bu tabaka, yüksek yüzey pürüzlülüğüne rağmen sürtünme katsayısını ve dolayısıyla aşınma miktarını azaltmaktadır (Figueiredo, 2011). Taban malzemeler ve TiN kaplamalar en yüksek aşınma hacim kaybını göstermiştir (taban malzeme V-N den hariç): Dievar (0,0573 mm³), D-TiN (0,0383 mm³) ve Vanadis 23 (0,00659 mm³). Bu yüksek kayıp, düşük nano sertlik (10-30 GPa), ince kaplama kalınlığı (TiN kaplamalarda) (1,00-1,08 μm) ve yüksek sürtünme katsayısı ($\mu \approx$ 0,299-0,321) ile ilişkilendirilebilir. Özellikle D-TiN, yüksek Ra (0,219 μm) ve düşük adezyon (62,2 N) nedeniyle kaplamanın soyulmasına ve taban malzemenin daha erken maruz kalmasına yol açtığı düşünülmektedir. TiSiN kaplamalarda Vanadis 23 tabanlı V-TiSiN numunesi, grup içinde en iyi ikinci aşınma direncini göstermiştir. Bu başarılı performans, kaplamanın yüksek sertliği, nispeten düşük sürtünme katsayısı ve düşük yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilebilir. Vanadis 23 tabanlı numuneler (V-TiSiN ve V-N-TiSiN) TiSiN grubunda genel olarak en düşük hacim kaybını sergilerken, Dievar tabanlı kaplamalar belirgin biçimde daha fazla aşınmıştır. Bu durum, Dievar numunelerinde adezyon dayanımının daha düşük olması ve yüzeyden erken kaplama kopmasının kolaylaşmasıyla açıklanabilir. TiAlCrN kaplamalarda Dievar tabanı, daha dengeli bir aşınma davranışı sunarken, Vanadis 23'ün nitrürlü örneğinde nispeten yüksek yüzey pürüzlülüğü ve düşük kaplama kalınlığı nedeniyle aşınma miktarı artmıştır. TiAlN kaplamalarda aşınma davranışı geniş bir aralıkta değişmekle birlikte, en düşük değerler yine Vanadis 23 tabanında elde edilmiştir. Bu sonuç, yüksek sertlik ve yeterli yapışma dayanımının sağladığı yük taşıma kapasitesi ile uyumludur. Dievar tabanlı TiAlN kaplamalar ise daha yüksek sürtünme katsayıları ve görece düşük adezyon dayanımı nedeniyle daha fazla malzeme kaybına uğramıştır.

Sonuç olarak, kaplamalar arasında TiCN en düşük sürtünme ve aşınma ile en üstün performansı gösterirken, Vanadis 23 tabanlı TiSiN düşük aşınma ile ikinci sırada yer alır. TiAlCrN ve TiAlN kaplamalar orta düzeyde direnç göstermektedir. Dievar tabanlı numuneler genellikle daha iyi yapışma sergilerken, Vanadis 23 tabanlı nitrürlenmiş numuneler bazı gruplarda avantaj sağlamıştır. TiN kaplamalar ise en zayıf performansı göstermiştir.



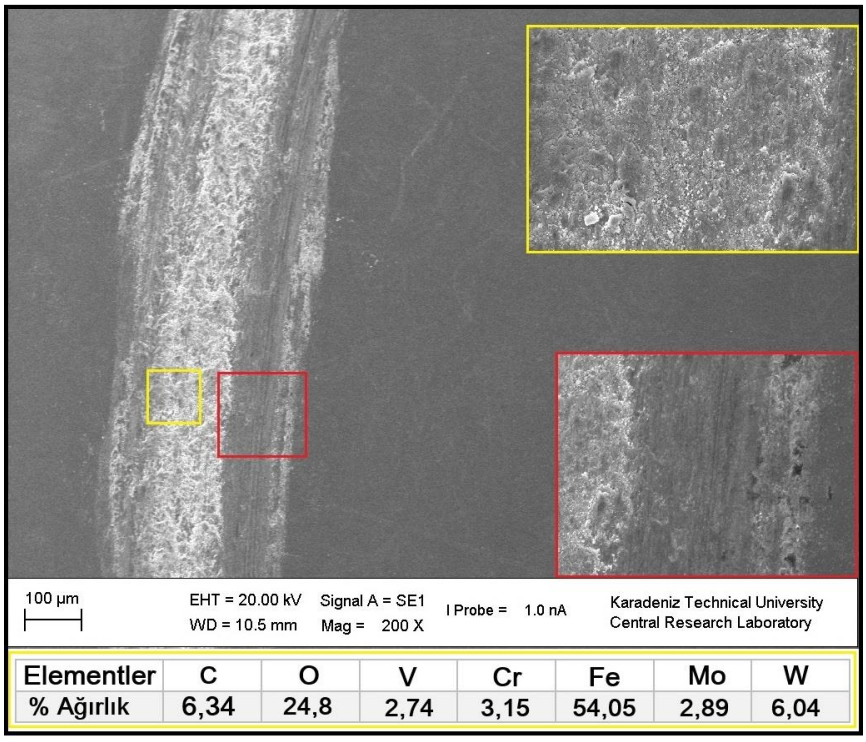
Elementler	C	N	O	Si	V	Cr	Fe	Mo
% Ağırlık	6,05	0,36	18,01	0,65	0,75	3,85	68,56	1,78

Şekil 101. Dievar çeliği- taban malzeme numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



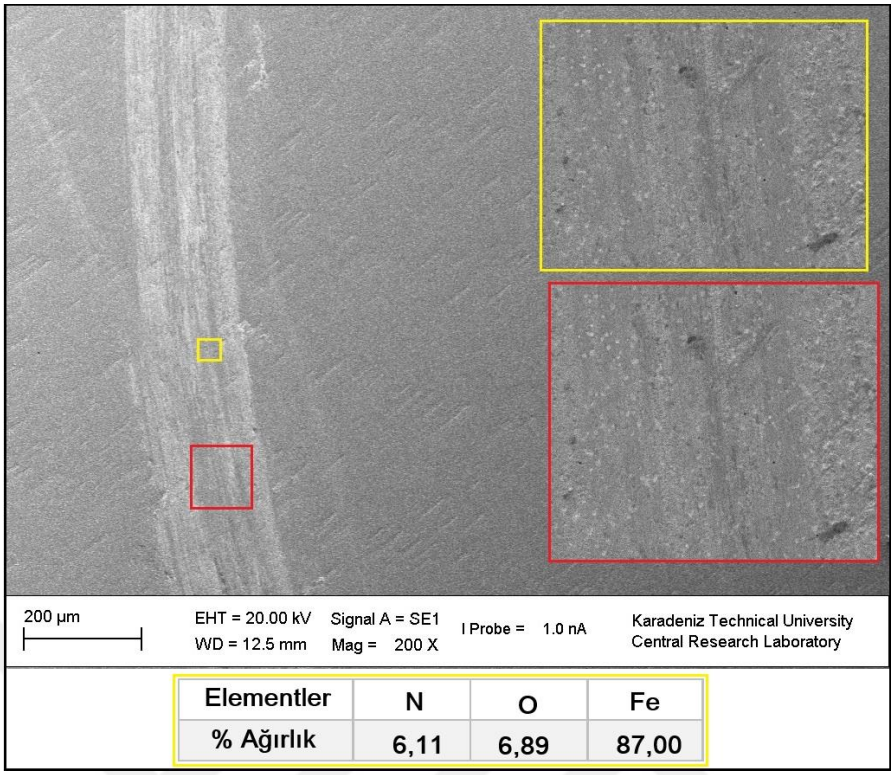
Elementler	C	N	O	Si	V	Cr	Fe	Mo
% Ağırlık	4,09	2,45	4,19	0,78	0,89	4,79	80,60	2,13

Şekil 102. Dievar-Nitrürlü numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



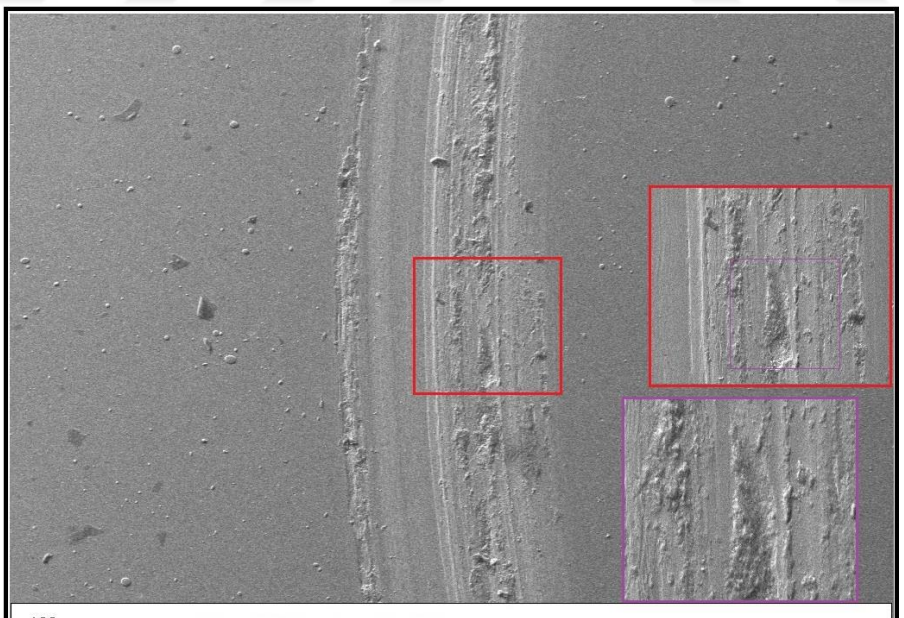
Elementler	C	O	V	Cr	Fe	Mo	W
% Ağırlık	6,34	24,8	2,74	3,15	54,05	2,89	6,04

Şekil 103. Vanadis 23- taban malzeme numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



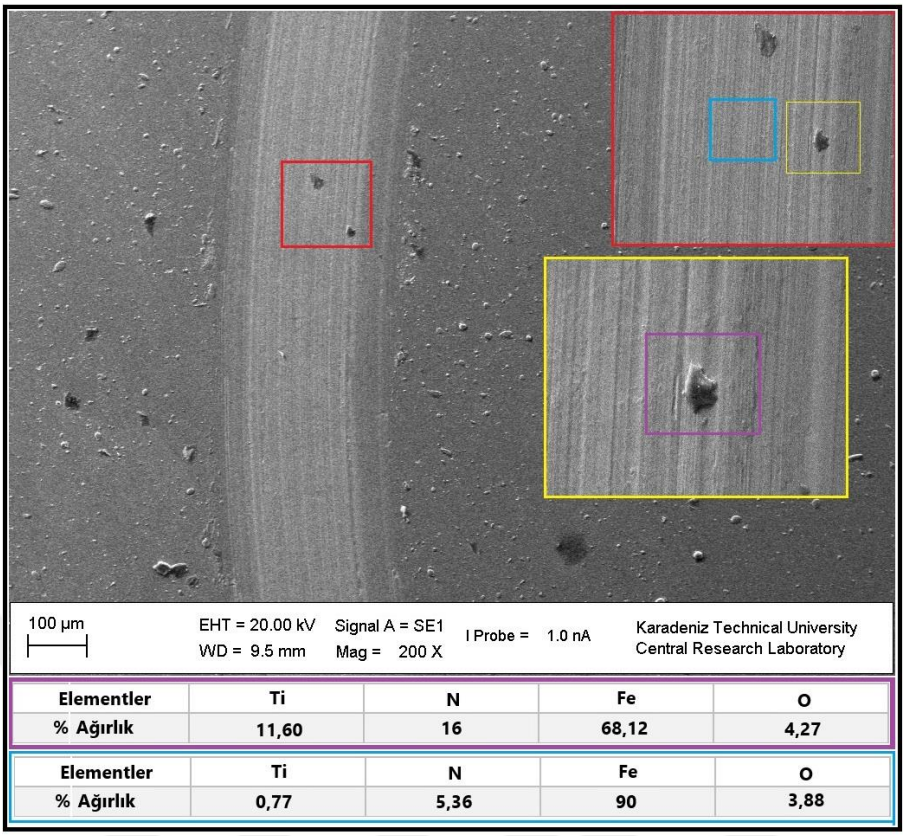
Elementler	N	O	Fe
% Ağırlık	6,11	6,89	87,00

Şekil 104. Vanadis 23-Nitrürlü numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



Elementler	Ti	N	Fe	O
%Ağırlık	2,79	3,72	79,69	12,85

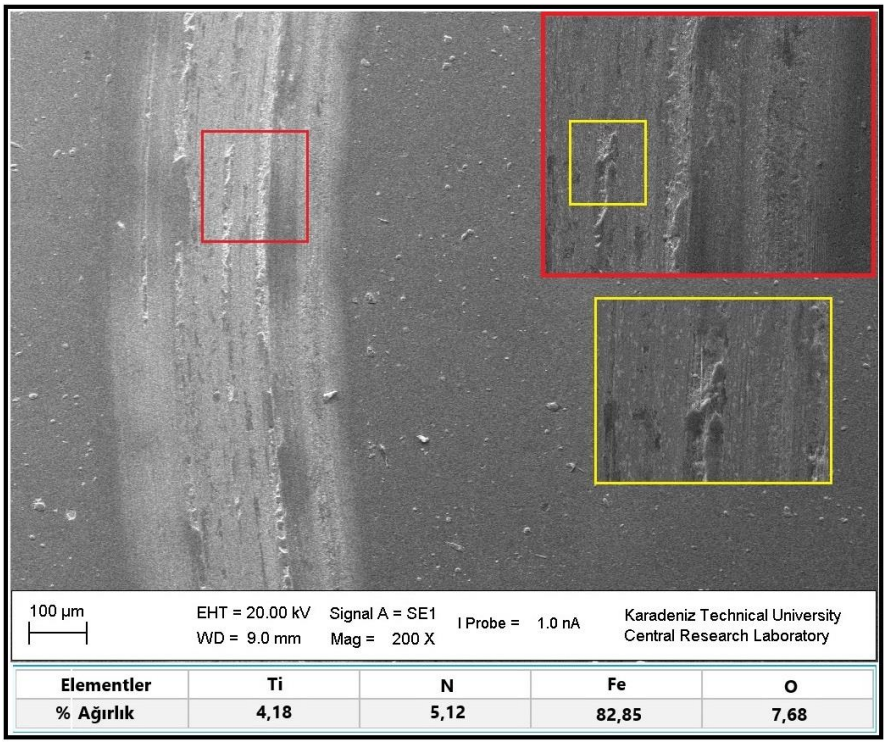
Şekil 105. D-TiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



Elementler	Ti	N	Fe	O
% Ağırlık	11,60	16	68,12	4,27

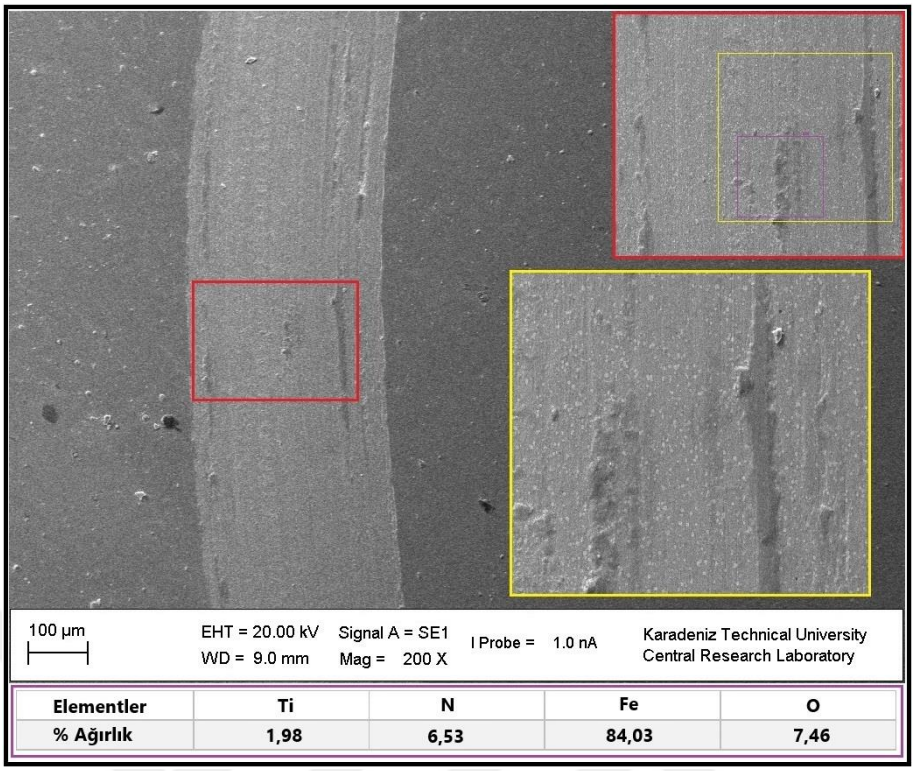
Elementler	Ti	N	Fe	O
% Ağırlık	0,77	5,36	90	3,88

Şekil 106. D-N-TiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



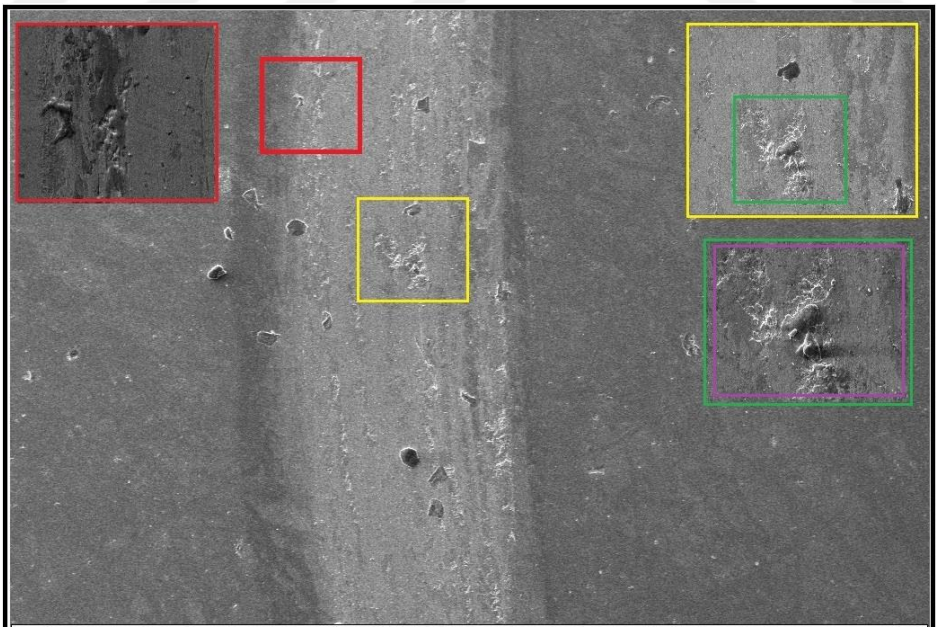
Elementler	Ti	N	Fe	O
% Ağırlık	4,18	5,12	82,85	7,68

Şekil 107. V-TiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



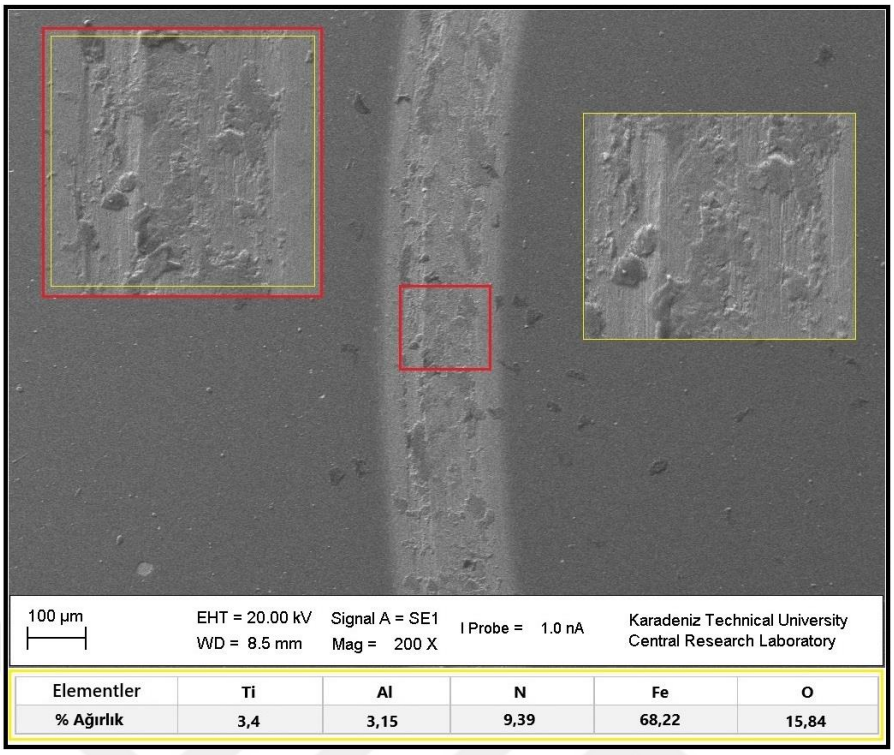
Elementler	Ti	N	Fe	O
% Ağırlık	1,98	6,53	84,03	7,46

Şekil 108. V-N-TiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



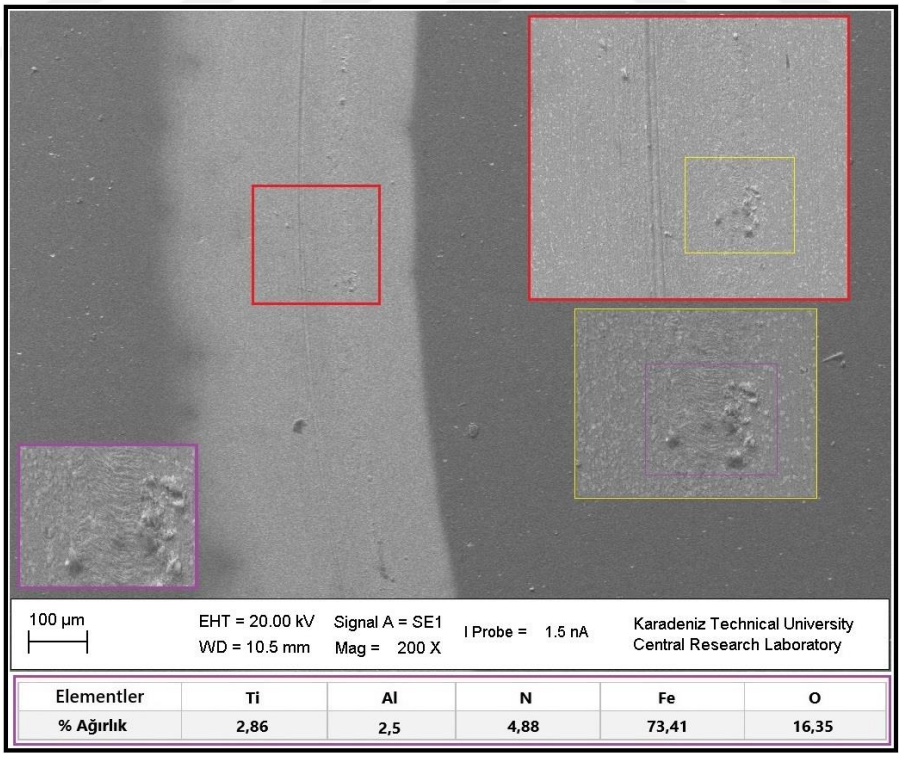
Elementler	Ti	Al	N	Fe	O
% Ağırlık	3,87	5,04	9,8	65,51	15,77

Şekil 109. D-TiAlN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



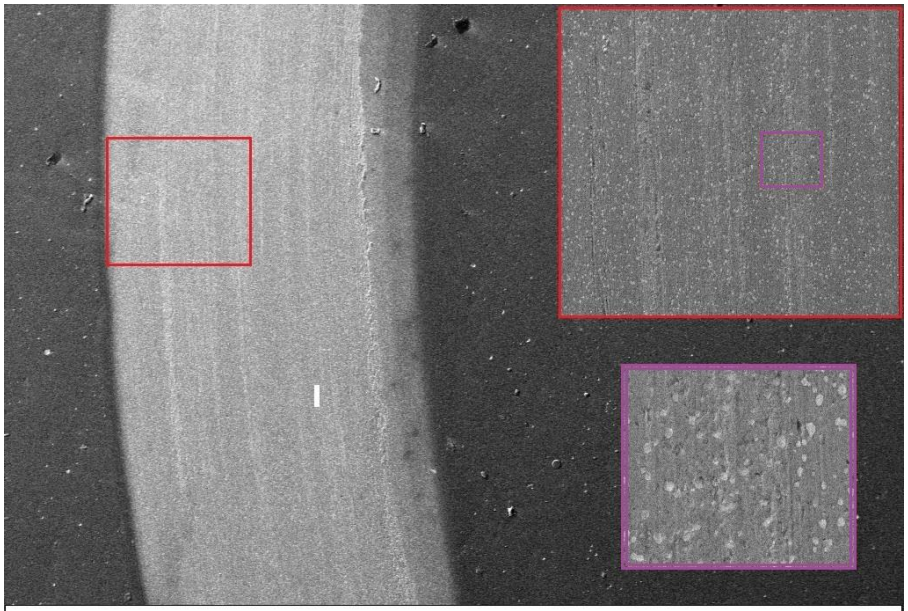
Elementler	Ti	Al	N	Fe	O
% Ağırlık	3,4	3,15	9,39	68,22	15,84

Şekil 110. D-N-TiAlN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



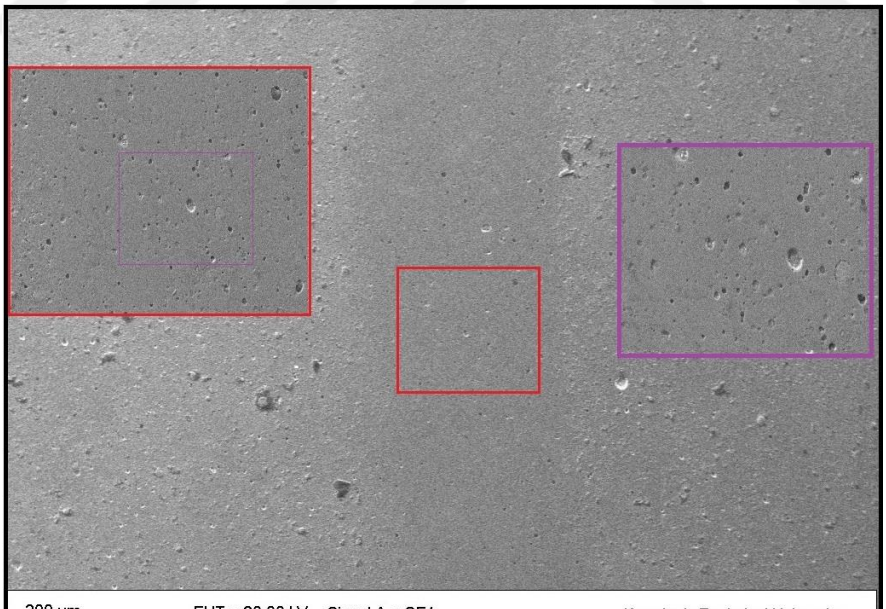
Elementler	Ti	Al	N	Fe	O
% Ağırlık	2,86	2,5	4,88	73,41	16,35

Şekil 111. V-TiAlN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



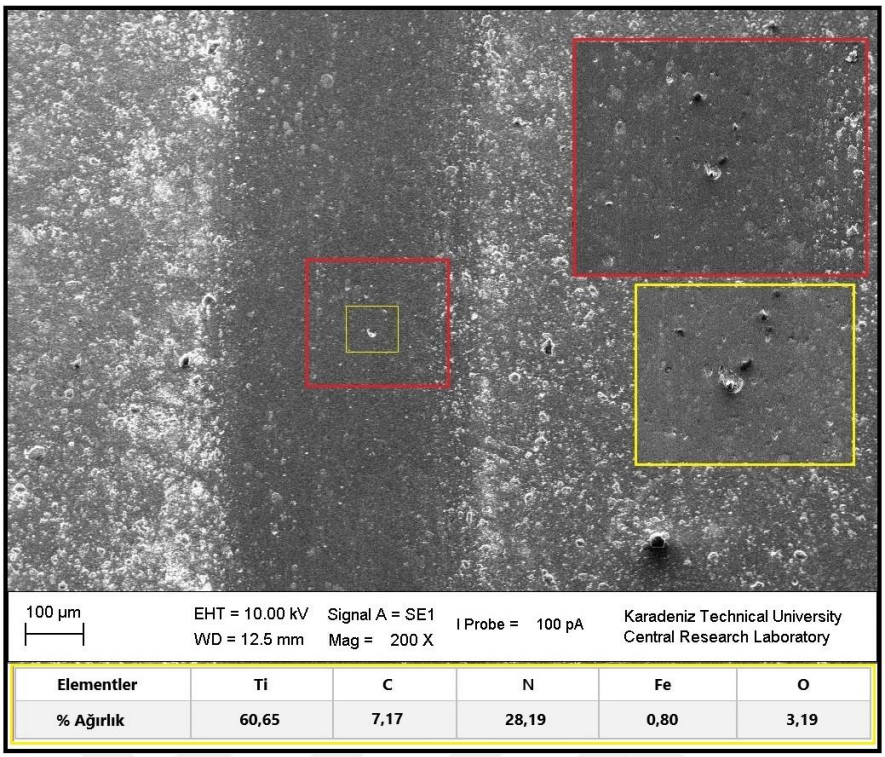
Elementler	Ti	Al	N	Fe	O
% Ağırlık	0,98	1,7	4,82	87,75	4,75

Şekil 112. V-N-TiAlN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



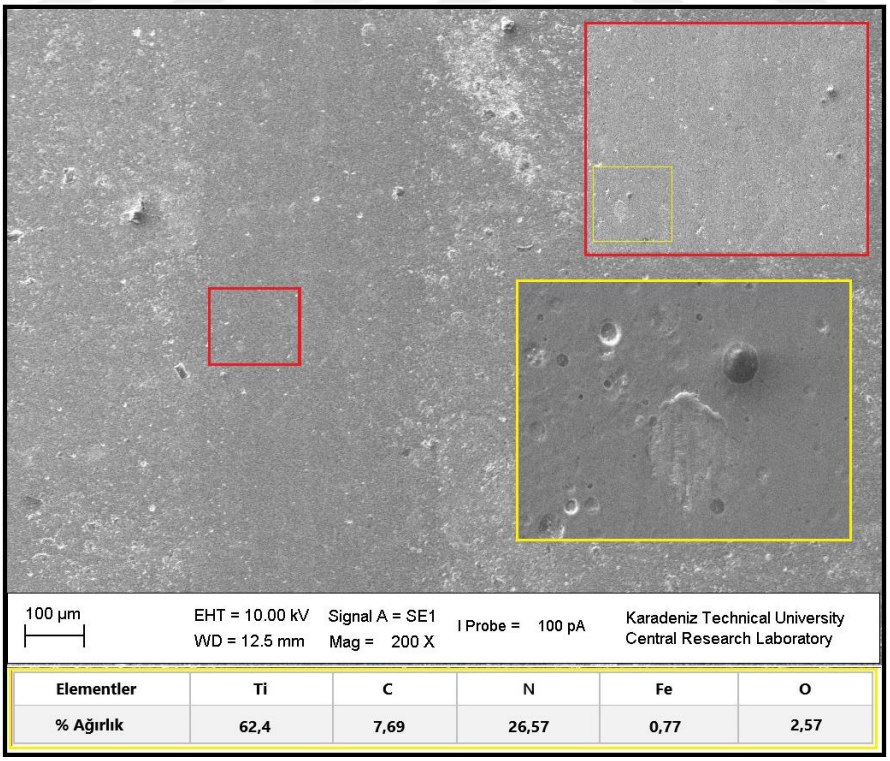
Elementler	Ti	C	N	Fe	O
% Ağırlık	61,6	8,88	25,43	0,79	3,3

Şekil 113. D-TiCN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



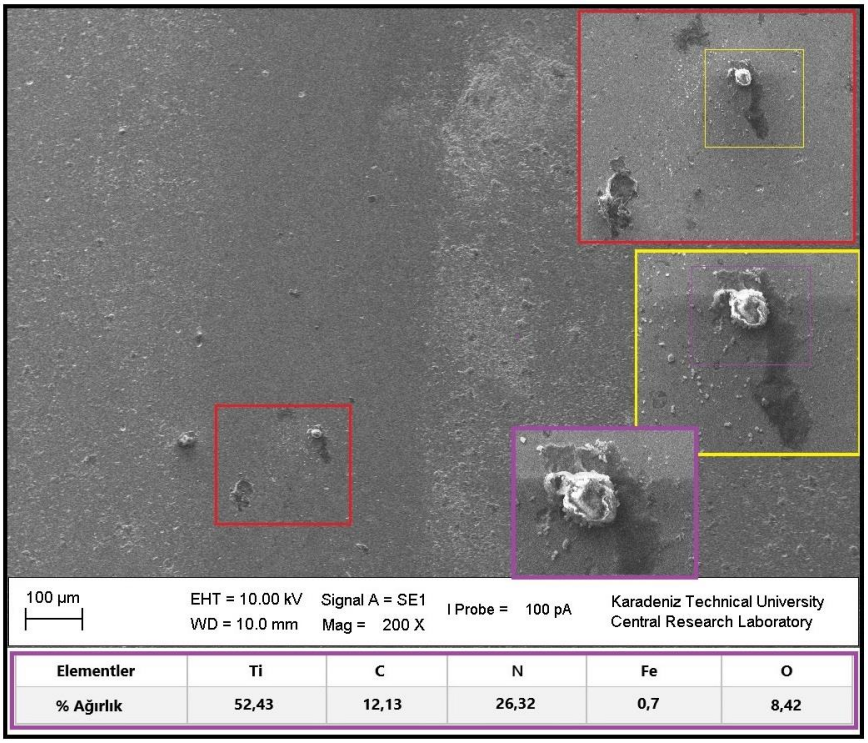
Elementler	Ti	C	N	Fe	O
% Ağırlık	60,65	7,17	28,19	0,80	3,19

Şekil 114. D-N-TiCN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



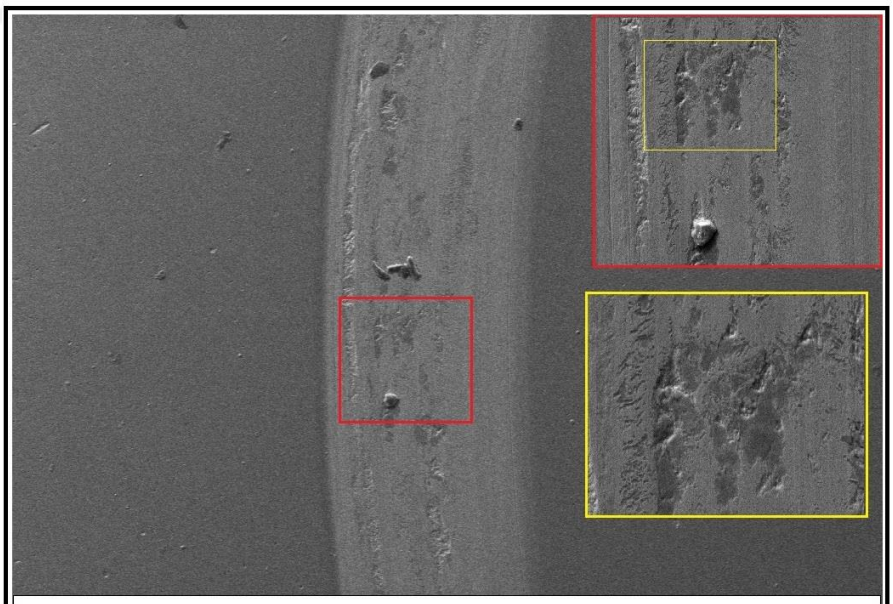
Elementler	Ti	C	N	Fe	O
% Ağırlık	62,4	7,69	26,57	0,77	2,57

Şekil 115. V-TiCN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



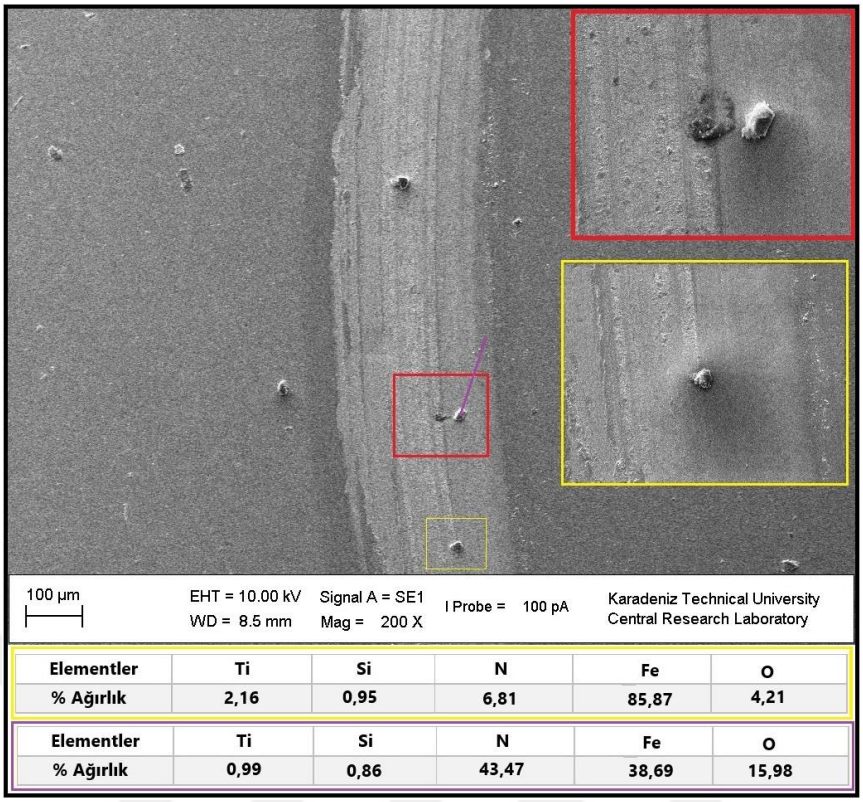
Elementler	Ti	C	N	Fe	O
% Ağırlık	52,43	12,13	26,32	0,7	8,42

Şekil 116. V-N-TiCN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



Elementler	Ti	Si	N	Fe	O
% Ağırlık	5,23	0,96	4,28	79,2	6,11

Şekil 117. D-TiSiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



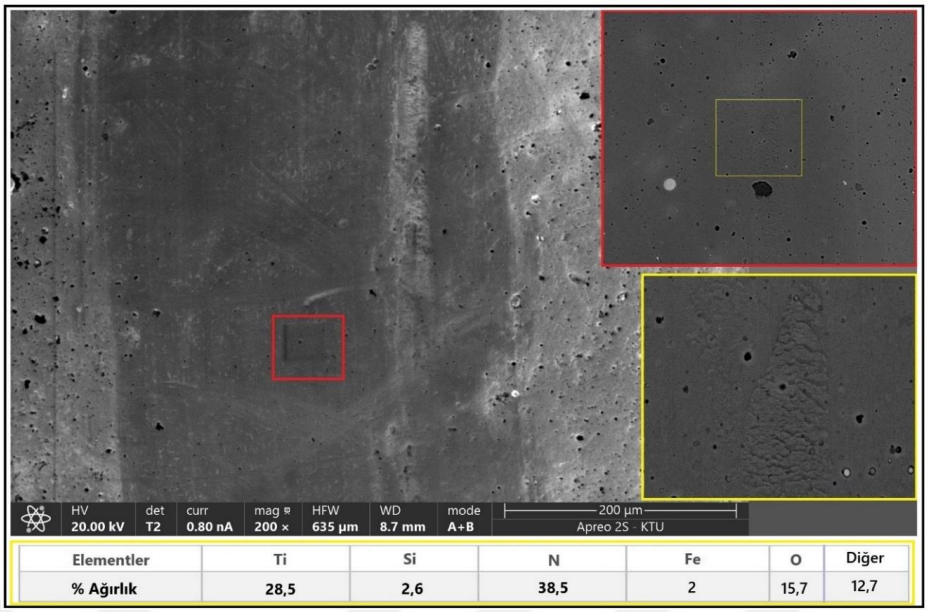
Elementler	Ti	Si	N	Fe	O
% Ağırlık	2,16	0,95	6,81	85,87	4,21

Elementler	Ti	Si	N	Fe	O
% Ağırlık	0,99	0,86	43,47	38,69	15,98

Şekil 118. D-N-TiSiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi

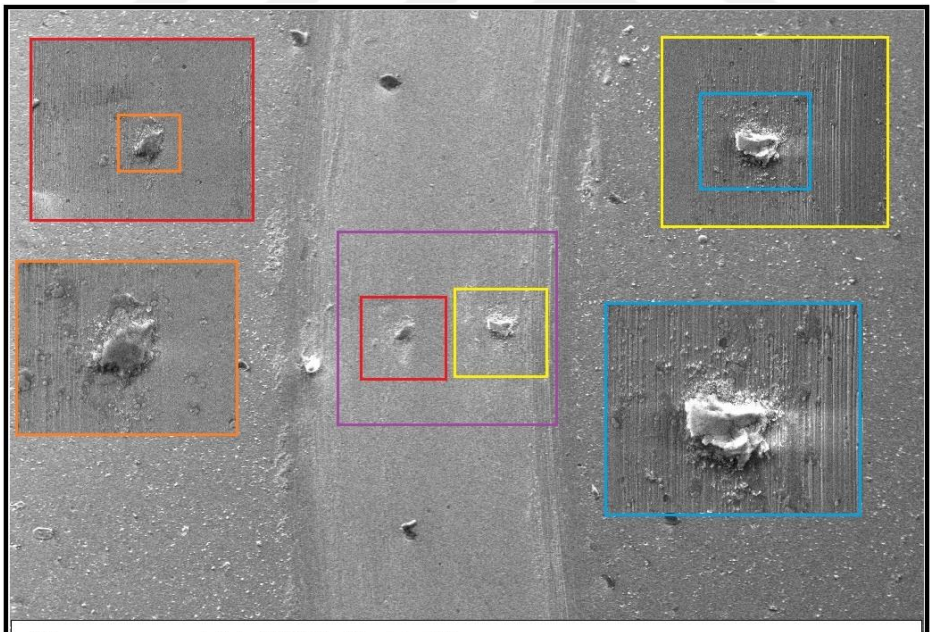
Elementler	Ti	Si	N	Fe	O
% Ağırlık	54,01	3,54	36,8	4,39	1,25

Şekil 119. V-TiSiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



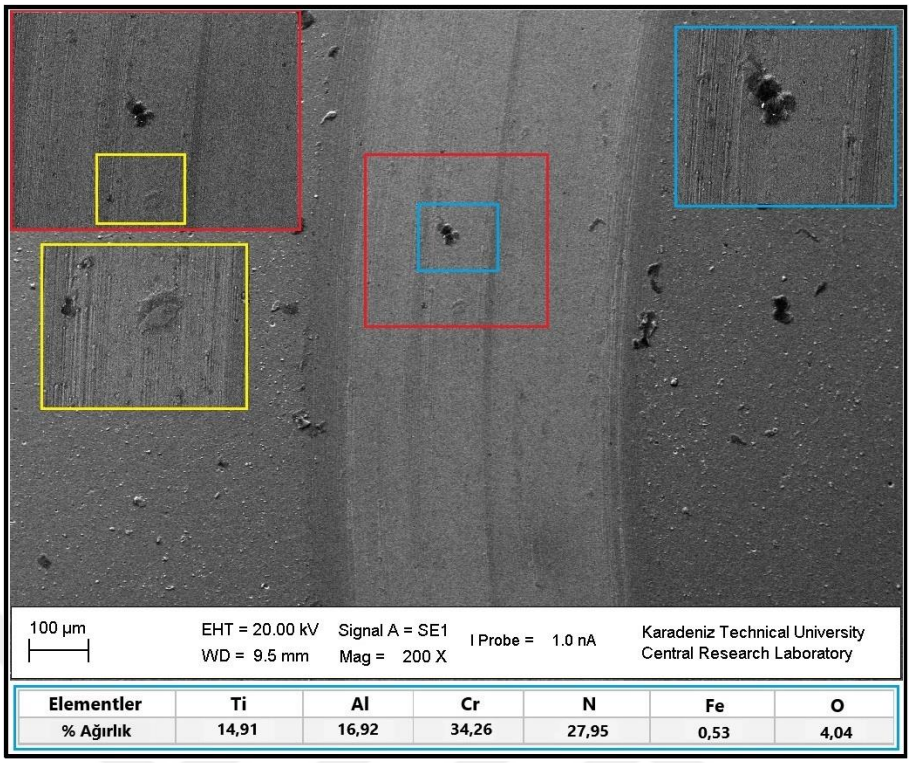
Elementler	Ti	Si	N	Fe	O	Diğer
% Ağırlık	28,5	2,6	38,5	2	15,7	12,7

Şekil 120. V-N-TiSiN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



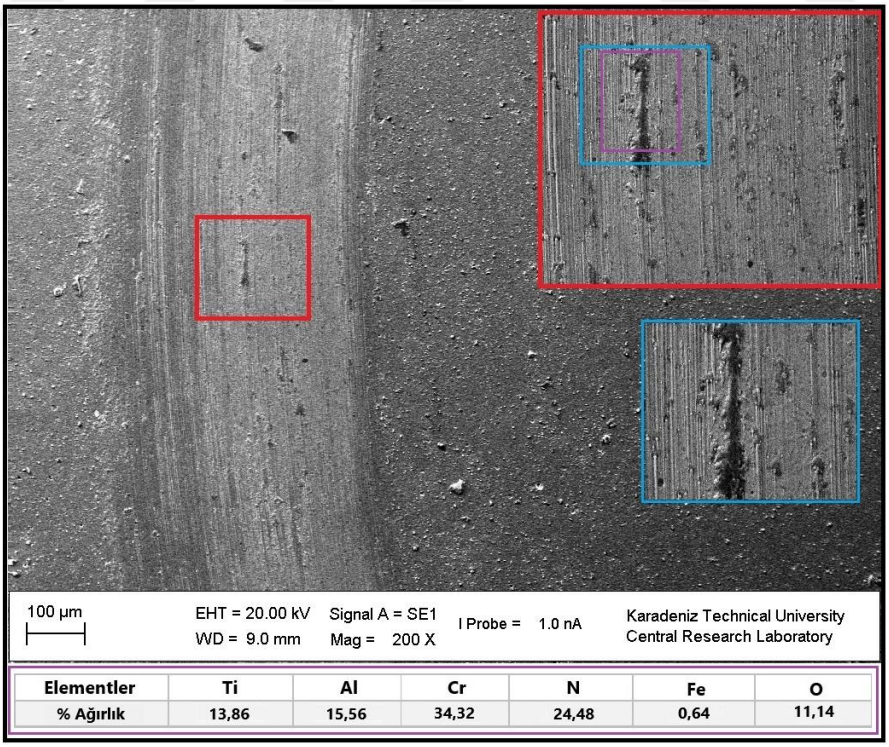
Elementler	Ti	Al	Cr	N	Fe	O
% Ağırlık	14,05	15,68	34,38	27,95	0,67	7,27

Şekil 121. D-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



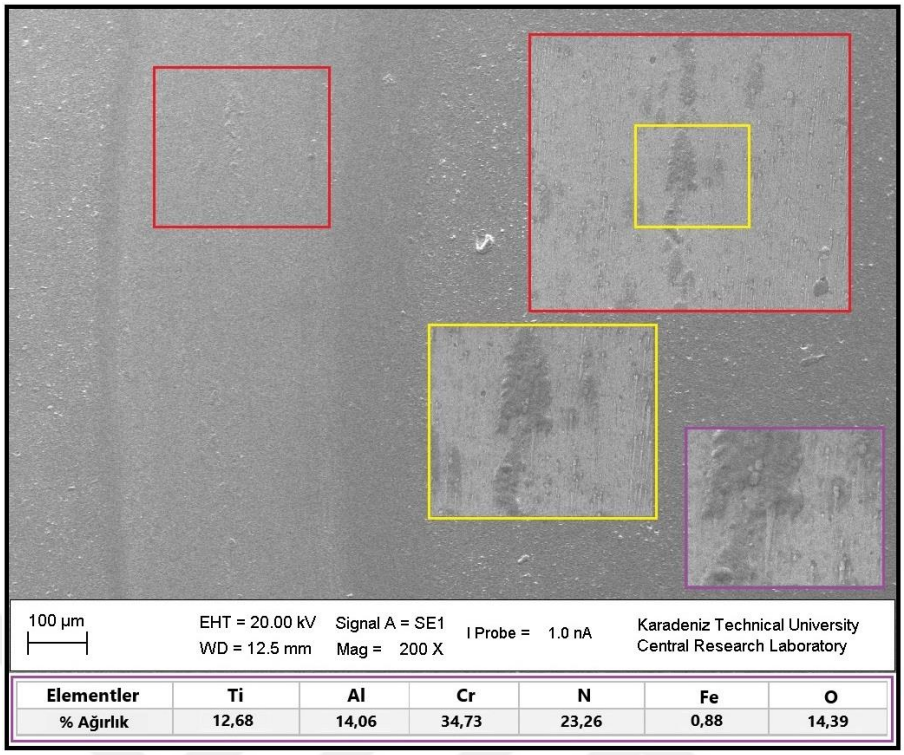
Elementler	Ti	Al	Cr	N	Fe	O
% Ağırlık	14,91	16,92	34,26	27,95	0,53	4,04

Şekil 122. D-N-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



Elementler	Ti	Al	Cr	N	Fe	O
% Ağırlık	13,86	15,56	34,32	24,48	0,64	11,14

Şekil 123. V-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi



Elementler	Ti	Al	Cr	N	Fe	O
% Ağırlık	12,68	14,06	34,73	23,26	0,88	14,39

Şekil 124. V-N-TiAlCrN numunesine ait aşınma izinin SEM görüntüsü ve bölgesel EDS analizi

Bilye-disk aşınma deneylerinden sonra, aşınma mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla taban malzeme ve kaplamaların aşınma izleri SEM ve EDS analizleri ile detaylı olarak incelenmiştir. Taban malzemelerde, Dievar çeliğinin yüzeyinde belirgin paralel çizikler, malzeme yığılmaları ve delaminasyon izleri adezif ve abrazif aşınmanın birlikte etkili olduğunu gösterirken %18,01 oksijen varlığı kararsız oksit filmlerinin mekanik yük altında çatlayıp soyularak yeniden oluştuğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, düşük matris sertliği yük taşıma kapasitesini sınırlayarak malzeme kaybını artırmaktadır (Şekil 101). Nitrürlenmiş Dievar çeliğinde oluşan gevrek nitrür tabakasının etkisinden adezif mekanizma Dievara göre azalmış ve abrazif mekanizmalar daha baskın hâle geldiği görünmektedir. EDS analizinde, %4,19 oksijen ile oksidatif aşınma belirgin ölçüde azalırken %2,45 nitrür difüzyonunu doğrulamaktadır (Şekil 102). Ayrıca iz genişlikleri işlemsiz Dievar'da daha fazla olmaktadır. İşlemsiz Vanadis 23'te derin oluklanma, üçüncü cisim etkisi ve %24,8 oksijen oranı oksidatif aşınmayı baskın kılmaktadır. Genel baskın mekanızma adezif-oksidatif ve kısmen abrazif sayılmaktadır (Şekil 103). Nitrürlenmiş Vanadis 23'te %6,11 azot ve %6,89 oksijen ile nitrür fazları oksidatif aşınmayı sınırlamakta, aşınma izi ince ve homojen olup abrazif ile kısmen adezif

deformasyonlara marüz kalmaktadır (Şekil 104). TiN kaplamalarda, Dievar-TiN numunesinde %79,69 demir ve %12,85 oksijen içeriği; kaplamanın aşınarak alt tabakanın açığa çıktığını ve tribo-oksidasyonun gerçekleştiğini göstermektedir. Düşük %2,79 titanyum ve %3,72 azot oranları ise kaplama tabakasının koruyuculuğunun zayıfladığını doğrulamaktadır. SEM görüntülerinde gözlenen oluklar, plastik deformasyon, adezif ve abrazif aşınma etkileşimini yansıtmaktadır. Dievar-N-TiN'de titanyum ve azot belli bölgelerde korunurken oksijen %3-4'e inmekte, mikro-çukurcuklar ve yerel kopmalar abrazif ile adezif mekanizma öne çıkarmakta; nitrürleme sertlik değerini yükselterek kaplamanın aşınma dayanımını desteklediği düşünülmektedir. Vanadis 23-TiN numunesinde %4,18 titanyum, %5,12 azot, %82,85 demir ve %7,68 oksijen tespit edilmiştir. Bu oranlar, kaplamanın büyük ölçüde aşındığını ve tabaka kalınlığının düşük olduğunu göstermektedir. Bu durum, TiN kaplamalarının tamamı için geçerlidir. Belirgin çizikler ile adezif mekanizmaya dayalı bölgeler ve oksidatif aşınma mekanızması daha baskındır. Nitrürlenmiş Vanadis 23-TiN'de ise %1,98 titanyum, %6,53 azot, %84,03 demir ve %7,46 oksijen kısmi bozulmaya rağmen adezyon artışı ve abrazif-oksidatif mekanizmaların kombinasyonunu sürdürmektedir (Şekil 105-108). TiAlN kaplamalarda abrazif, adezif ve oksidatif mekanizmalar birlikte etkili olmuştur. D-TiAlN yüzeylerinde çizikler ve mikro-yığılmalar oksidatif katkıyı gösterirken, EDS analizlerindeki Fe ve O artışı bu mekanizmayı doğrulamaktadır. D-N-TiAlN numunesinde daha düzenli oluklar ve dar izler gözlenmiş, nitrürleme sertlik ve adezyon dayanımını artırarak tribolojik performansı iyileştirmiştir. V-TiAlN numunelerinde ise oksidatif aşınma etkisi hala görülmektedir, mikro-yığılmalar ve adezif izler taban desteğinin sınırlı kaldığını göstermektedir. V-N-TiAlN'de paralel oluklar abrasif kontrollü aşınmayı yansıtırken, düşük Ti-Al oranı kaplamanın uzaklaştığını göstermektedir. Oksijen oranının V-N-TiAlN'de daha düşük olması, oksidatif aşınma etkisinin zayıfladığını ve aşınmanın azaldığını ortaya koymaktadır (Şekil 109-112). TiCN kaplamalarda, D-TiCN EDS analizinde, %61,6 titanyum, %8,88 karbon, %25,43 azot, %3,3 oksijen ve %0,79 demir tespit edilmiş olup, bu değerler kaplamanın kimyasal bütünlüğünü ve koruyucu karakterinin devam ettiğini doğrulamaktadır. D-N-TiCN numunesinde %60,65 titanyum, %7,17 karbon ve %28,19 azot korunurken, %3,19 oksijen içeriği oksidatif eğilimin sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu numunede belirgin delaminasyon izlenmemiş olup bölgesel çizikler ve mikro-hasarlar, abrazif etkileşimi ve düşük oksidatif katkıyı işaret etmektedir. V-TiCN kaplamasında %62,4 titanyum, %26,57 azot, %2,57 oksijen ve %7,69 karbon homojen kaplama yapısını doğrulamaktadır (oksijen oranı en az seviyede). V-N-

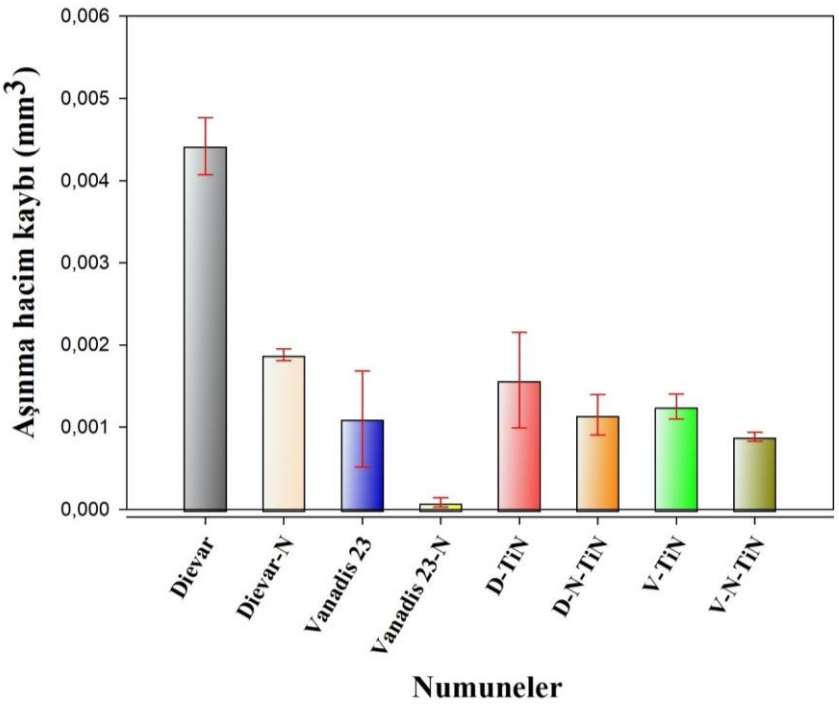
TiCN'de ise %52,43 titanyum, %12,13 karbon, %26,32 azot ve %8,42 oksijen içeriği oksidatif aşınma eğiliminin arttığını göstermektedir. Yüzeyden kopan parçacıklar abrazif etki yaratmasına karşın nitrürlenmemiş duruma göre daha az aşınma gözlenmiştir. Genel olarak TiCN kaplamalarda, katodik ark buharlaştırma (PVD) yöntemine özgü çukurcuk ve mikro-gözenek oluşumları çatlak başlatmaya eğilimli olsa da yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek Lc_2 değerleri dar aşınma izleriyle birlikte iyi bir aşınma performansı sergilemektedir (Şekil 113-116). TiSiN kaplamalarda, D-TiSiN yüzeyinde yüksek demir ve oksijen oranı kaplama aşınmasını ve alt tabakanın yer yer açığa çıktığını göstermekte olup, çatlaklar ve daha zayıf adezyonu doğrulamaktadır. D-N-TiSiN kaplamasında nitrürleme, kaplama bütünlüğünü koruyarak aşınma direncini artırmaktadır. Yüksek azot içeriği ise üçüncü cisim tabakası oluşturarak abrazif-adezif aşınma bileşimini güçlendirmektedir. V-TiSiN kaplamalarda yüksek Ti ve N oranları sert faz bütünlüğünü sağlarken, düşük Fe ve O içerikleri sınırlı oksidatif aşınmayı işaret etmektedir. V-N-TiSiN yüzeyinde ise nitrürlü yapının koruyucu etkisi sürmekte, oksidatif üçüncü cisim etkisi belirginleşmekte ve adezif aşınma baskın hâle gelmektedir. Her iki Dievar ve nitrürlenmiş Dievar (D ve D-N) TiSiN kaplamada, Vanadis 23 numunelerine kıyasla daha yüksek aşınma oranı gözlenmiştir. Bu durum, yüzeyden kopan sert kaplama parçacıklarının üçüncü cisim olarak aşındırıcı etki göstermesiyle açıklanabilir. Bu etki, şekillerde de görüldüğü üzere, abrazif aşınma mekanizmasını daha belirgin hâle getirmiştir (Şekil 117-120). TiAlCrN kaplamalarının EDS ve SEM bulgularında, tüm numunelerde Ti-Al-Cr-N oranlarının korunduğu, demir ve oksijen miktarlarının ise sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Genel olarak, üçüncü cisim etkisi ile abrazif aşınması ise oksidatif aşınma mekanizması da ikincil mekanizma olarak gözlenmiştir. D-TiAlCrN numunesinde düşük oksijen ve demir içerikleri kaplamanın kimyasal bütünlüğünü koruduğunu göstermekte; çukurcuk ve yığılmalar ise üçüncü cisim etkisini yansıtmaktadırD-N-TiAlCrN kaplamasında benzer bileşim korunmuş, düşük oksijen oranı mikro-oksidasyonu sınırlamıştır. Lokal çizikler ve mikro-yivler ise abrazif mekanizmanın sürdüğünü ve nitrürlenmemiş numuneye göre aşınmayı daha fazla etkilediğini göstermektedir. V-TiAlCrN numunesinde düşük demir ve oksijen oranları taban malzemenin korunduğunu ve yerel oksidasyonun tribo-oksidatif davranışa nisbeten katkı sağladığını göstermektedir. V-N-TiAlCrN yüzeyinde paralel çizikler ve malzeme kaldırılmaları abrazif karakteri vurgularken, yoğun çizik ağı üçüncü cisim etkisini ortaya koymaktadır. Nitrürlü taban malzemelerde aşınmanın daha fazla olmasının nedenlerinden biri, yüzeyden kopan sert parçacıkların üçüncü cisim olarak davranmasıdır. Bu parçacıklar,

özellikle nitrürlenmemiş Vanadis 23 numun esinde, üçüncü cisim abrazyonunun daha etkili olmasına yol açmaktadır (Şekil 121-124).

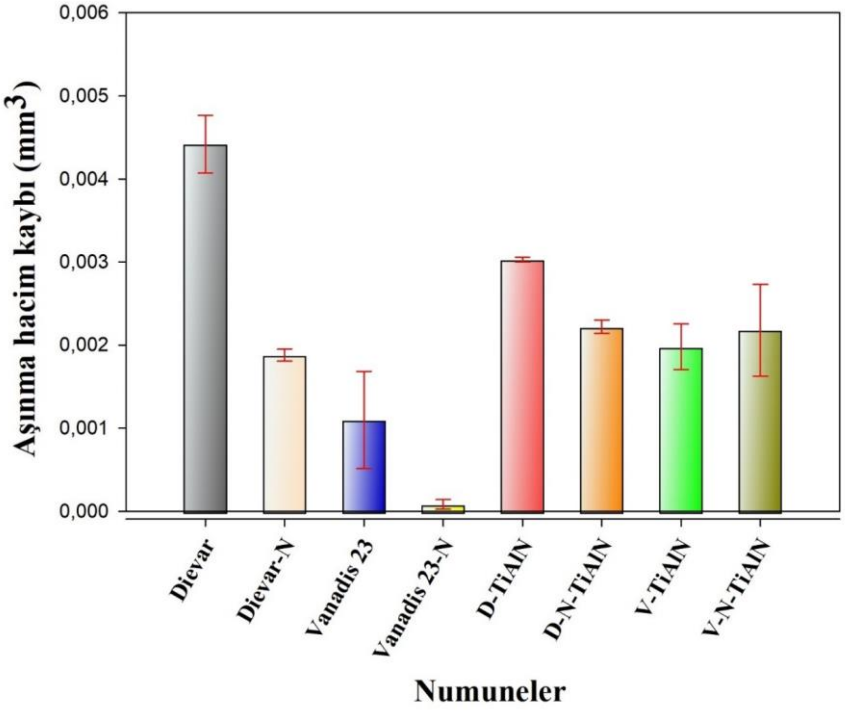
3.6. Darbeli Kayma Aşınma Testi Bulguları

Darbeli kayma aşınma testleri, kaplamaların tekrarlayan darbe ve eş zamanlı kayma yükleri altında gösterdikleri davranışları anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bu testler, özellikle kaplamaların darbe etkisi altında oluşacak aşınma mekanizmalarının ortaya çıkarılmasında, önemli bir rol üstlenmektedir.

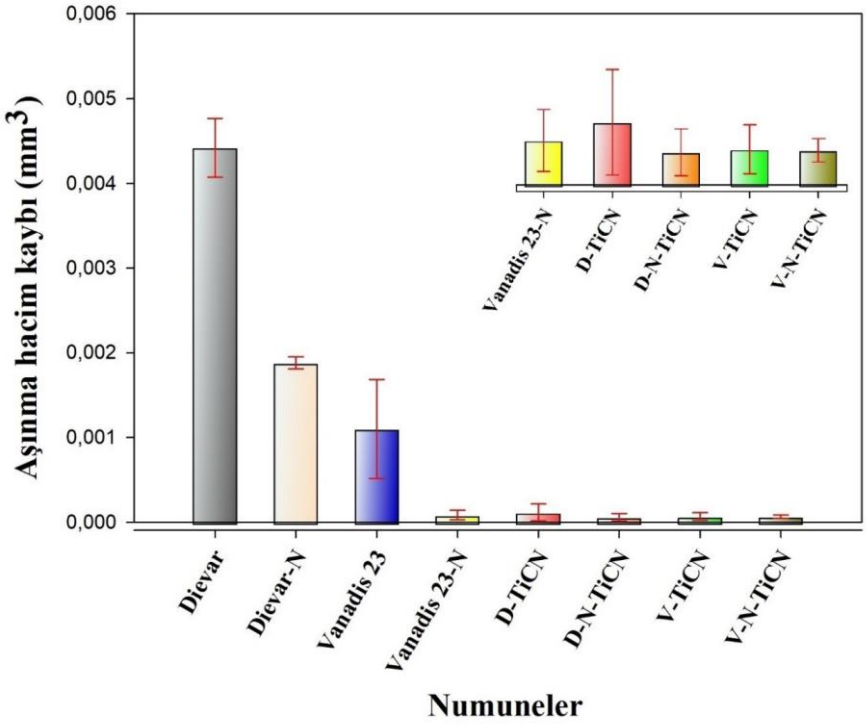
Bu bölümde, öncelikle darbeli kayma testlerinden elde edilen hacim kaybı sonuçları grafikler aracılığıyla sunulmuştur. Şekil 125'ten Şekil 131'e kadar olan grafiklerde farklı numuneler için gözlenen hacim kaybı değerleri ayrıntılı olarak karşılaştırılmakta; böylece kaplamaların darbeli kayma koşullarında gösterdikleri performansın nicel değerlendirmesi yapılmaktadır.



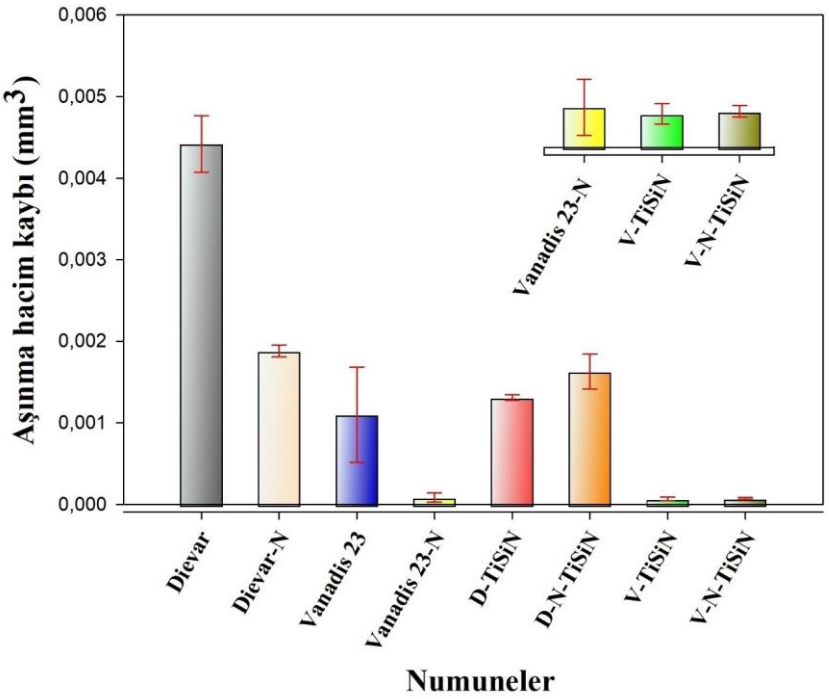
Şekil 125. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği



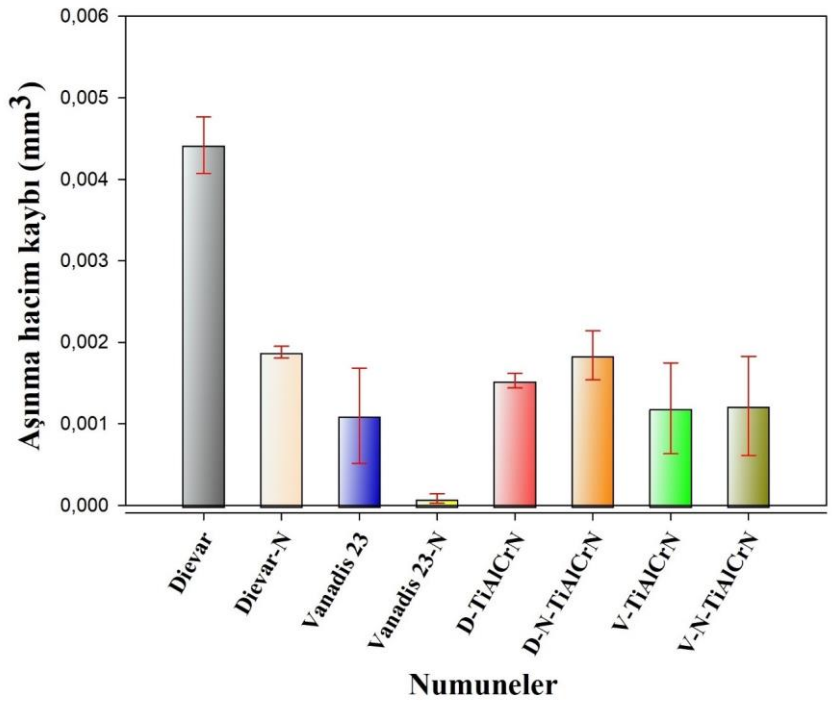
Şekil 126. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiAlN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği



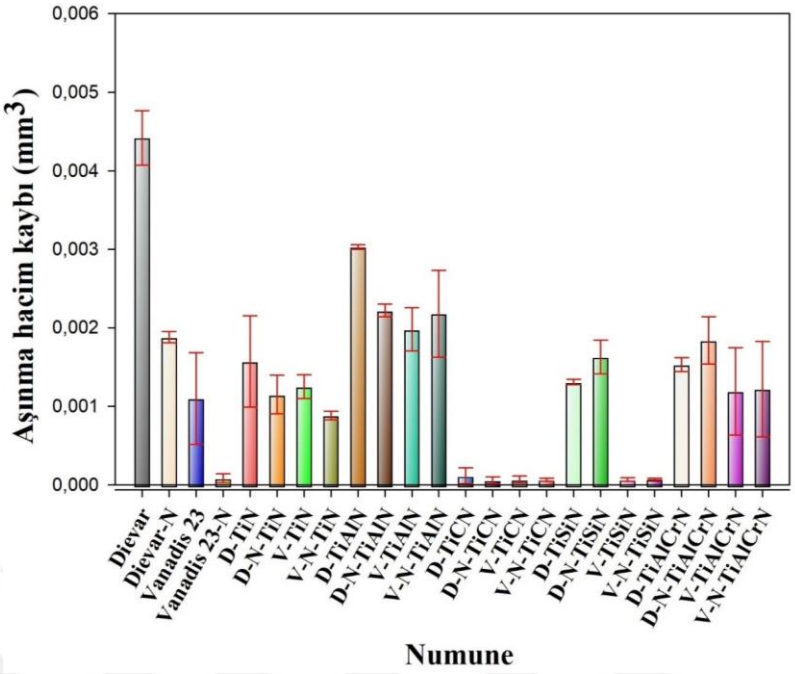
Şekil 127. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiCN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği



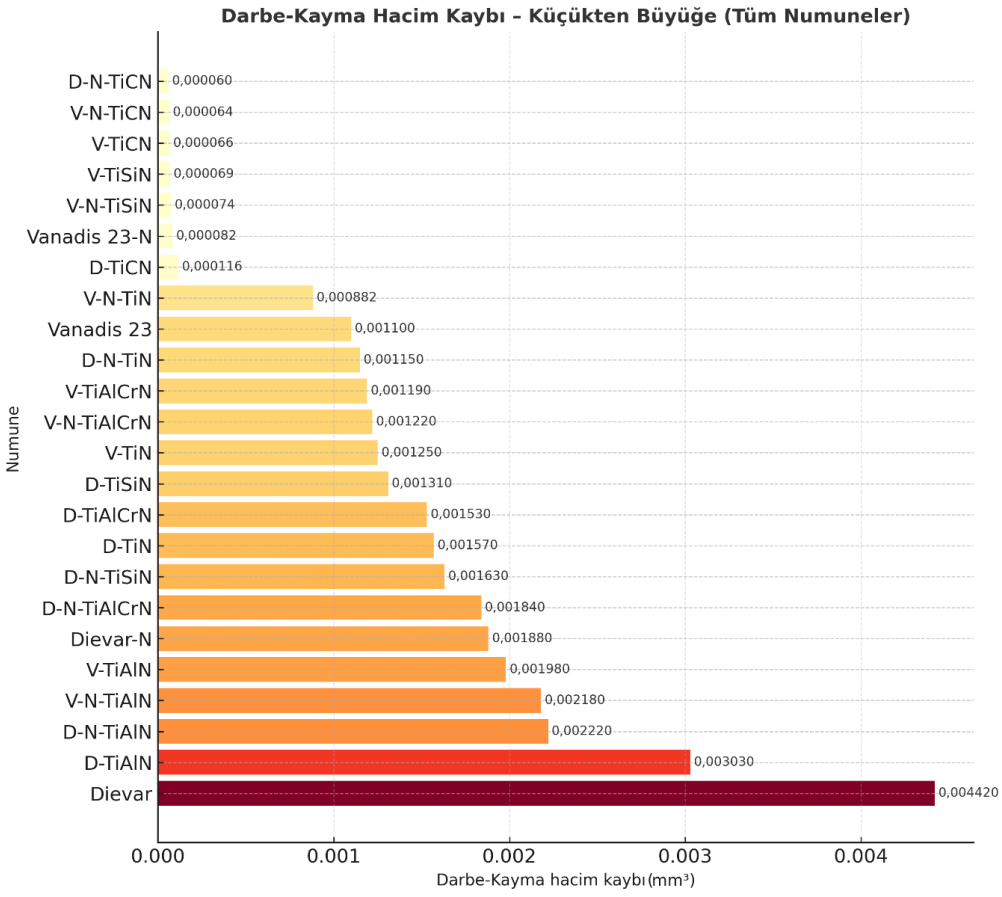
Şekil 128. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiSiN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği



Şekil 129. Taban malzemelerin işlemsiz, nitrürlenmiş ve TiAlCrN kaplamalı numunelerine ait darbeli-kayma aşınma hacim kaybı grafiği



Şekil 130. Tüm numunelerin darbeli-kayma aşınma hacim kayıp grafiği



Şekil 131. Tüm numunelerin darbeli-kayma aşınma hacim kayıp grafiği

Tüm numunelerin darbe-kayma hacim kaybı, (D-N-TiCN) 6×10^{-5} mm³ düzeyinden başlayarak kaplamasız Dievar'ın $4{,}42\times10^{-3}$ mm³ değerine kadar geniş bir aralıkta değişir. Bu fark, kaplama bileşimi, taban malzeme özellikleri, sertlik dayanımı, kaplama kalınlığı, adezyon, yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve sürtünme katsayısı (μ) arasındaki etkileşimle doğrudan ilişkilidir. Darbe yükleri altında çatlak oluşumu, malzeme yığılması ve yorulma aşınması baskın mekanizmalardır. Bu nedenle yüksek sertlik, kalın kaplama yapısı ve yüzey pürüzlülüğü bir arada bulunması kritik önem taşımaktadır. Bu bağlamda TiCN kaplamalar, yüksek nano sertliği (48-50 GPa), kalın tabakası (4,6-5,1 μm) ve grafit benzeri karbon fazının doğal yağlayıcı etkisiyle en düşük hacim kaybını (6×10^{-5} mm³ civarı) gösterir ve darbe etkisini absorbe eder, ısı birikimini minimize eder ayrıca çatlak ilerlemesini engeller. Özellikle D-N-TiCN numunesi, dengeli bir adezyon dayanımı (70 N) ile TiCN kaplamaları arasında en iyi performansı göstermiştir. V-N-TiCN ve V-TiCN numuneleri ise benzer başarıyı, yüksek adezyon dayanımı (105 N) ve kaplama kalınlığıyla desteklemiştir.

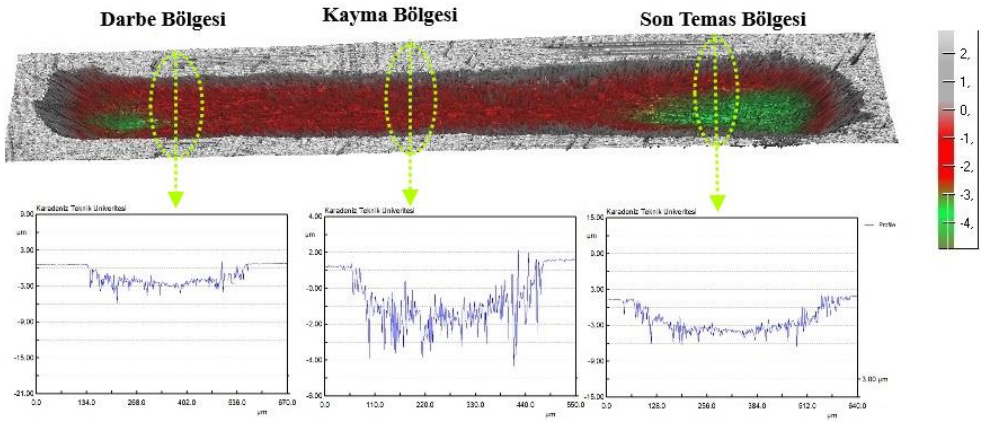
TiSiN kaplamalar ise ikinci en iyi kaplama olarak öne çıkar; Vanadis 23 taban malzemelerde (V-TiSiN ve V-N-TiSiN), yüksek sertlik (48 GPa) ve iyi adezyon dayanımı sayesinde 7×10^{-5} mm³ civarında kayıpla darbe direncini korumaktadır. Ancak D-TiSiN ve D-N-TiSiN kaplamalarda, adezyon dayanımının düşüşü (52-58 N), yüksek sertliğe rağmen daha düşük bir performans göstermektedir. TiAlCrN ve TiN kaplamalar orta düzeyde darbe-kayma direnci gösterir. TiAlCrN kaplamalarında, yüksek nano sertliği (44-54 GPa) ve kalın tabakası (1,2-4,7 μm) sayesinde $1{,}19\text{-}1{,}84\times10^{-3}$ mm³ aralığında hacim kaybıyla TiN kaplamalarina göre daha dengeli bir performans sergilemektedir. TiAlCrN kaplamalarında, Vanadis 23 taban malzemelerde (V-TiAlCrN ve V-N-TiAlCrN), ince yapılarına (1,2-2,3 μm) rağmen daha düşük hacim kaybı ($1{,}19\text{-}1{,}22\times10^{-3}$ mm³) göstererek üstün performans sergiler. Bu başarı, Vanadis 23 çeliğinin performansı ve nitrürleme etkisi ve yeterli adezyon dayanımı (56-80 N) ile bağlı olduğu düşünülmektedir. Buna karşılık, Dievar taban malzemelerde (D-TiAlCrN ve D-N-TiAlCrN) daha yüksek adezyon (80-86 N) avantajına sahip olsa da $1{,}53\text{–}1{,}84\times10^{-3}$ mm³ kayıpla geride kalır. Bu fark, daha kalın yapı olmasına rağmen darbe enerjisinin arayüzde etkisinden kaynaklanabilir. TiN kaplamalarinda ise ince kaplama kalınlığı (1 μm civarı) ve nispeten düşük adezyon dayanımı (V-TiN'den hariç) nedeniyle $0{,}88\text{-}1{,}57\times10^{-3}$ mm³ kayıpla erken delaminasyon riski taşımaktadır. Vanadis 23 tabanlı numunelerde, V-N-TiN kaplaması nitrürleme etkisiyle en yüksek değeri göstermiş olsa da genel olarak TiN kaplamaları sınırlı performans sergilemiştir. TiAlN kaplamalar genel olarak en zayıf performansı göstermektedir. D-TiAlN numunesi, düşük adezyon

dayanımı (64 N) ve ince kaplama kalınlığı (1,9 μm) nedeniyle darbe altında hızla çökmüş ve $3{,}03\times10^{-3}$ mm³ aşınma kaybı sergilemiştir. Buna karşın, D-N-TiAlN numunesinde nitrürleme işlemi adezyon dayanımını 75 N seviyesine yükselterek kaybı %27 oranında azaltmış ve $2{,}22\times10^{-3}$ mm³ düzeyine düşürmüştür. Vanadis 23 tabanlı TiAlN kaplamalarda ise adezyon dayanımındaki dalgalanma (44-87 N) nedeniyle aşınma kaybı orta-yüksek aralıkta kalmıştır.

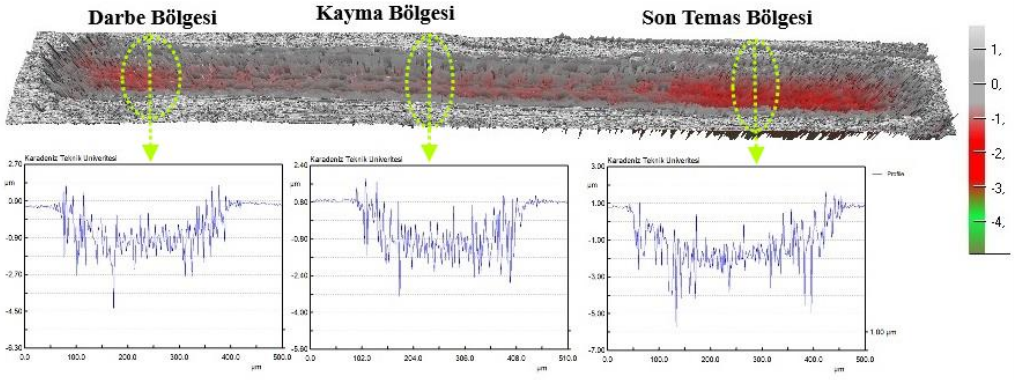
Genel olarak, darbe-kayma test bulgularında, TiCN kaplamalar en düşük hacim kaybıyla üstün direnç gösterirken, V-TiSiN az bir fark ile ikinci sırada yer almaktadır. TiAlCrN orta düzeyde performans sunmaktadır. TiN ve TiAlN en zayıf kaplama grupları sayılmaktadır. Ayrıca, nitrürlenmiş Vanadis 23 (Vanadis 23-N), $8{,}23\times10^{-5}$ mm³ kayıpla birçok kaplamayı geride bırakarak iyi bir performans sergilemektedir.

Darbeli-kayma testlerinden elde edilen hacim kaybı sonuçlarının yanı sıra, numunelerin aşınma davranışlarını daha ayrıntılı olarak incelemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzey morfolojileri analiz edilmiştir. Bu analizler, aşınma mekanizmalarının belirlenmesi, kaplama tabakalarındaki hasar türlerinin incelenmesi ve taban malzeme-kaplama etkileşimlerinin ortaya konulmasında kritik bir rol oynamaktadır.

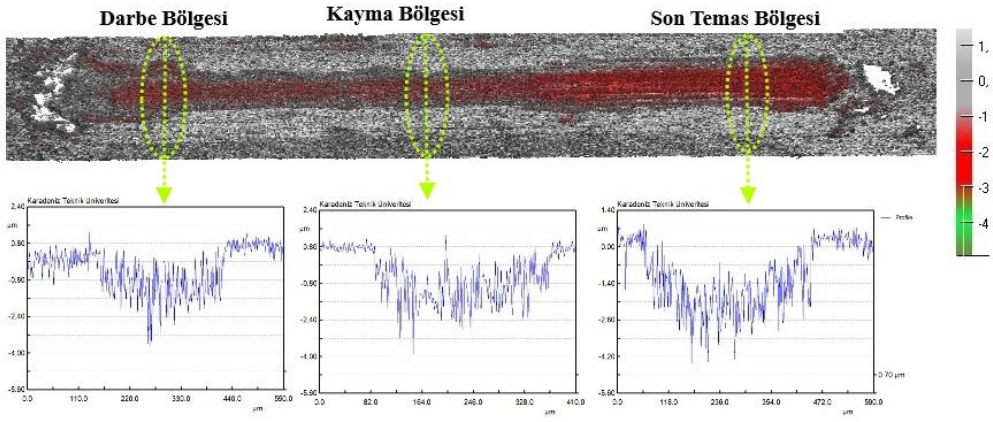
Uygulanan darbeli-kayma aşınma testi sonrasında yüzeylerde meydana gelen aşınma izleri optik profilometre ile ayrıntılı olarak değerlendirilmiş; darbe, kayma ve son temas bölgeleri belirlenerek Şekil 132-155'te sunulmuştur. Bu kapsamda, Şekil 156'dan Şekil 179'a kadar verilen SEM görüntüleri, farklı taban malzemeler (Dievar, Vanadis 23), nitrürlenmiş yüzeyler ve çeşitli PVD kaplamalar (TiN, TiAlN, TiCN, TiSiN, TiAlCrN) üzerinde gerçekleştirilen darbeli-kayma testleri sonrasında oluşan yüzey morfolojilerini göstermektedir. Şekiller, çatlak oluşumları, yüzeyden malzeme aşınması, plastik deformasyon bölgeleri ve adezyon/abrazyon etkileri hakkında ayrıntılı bilgiler sunmaktadır.



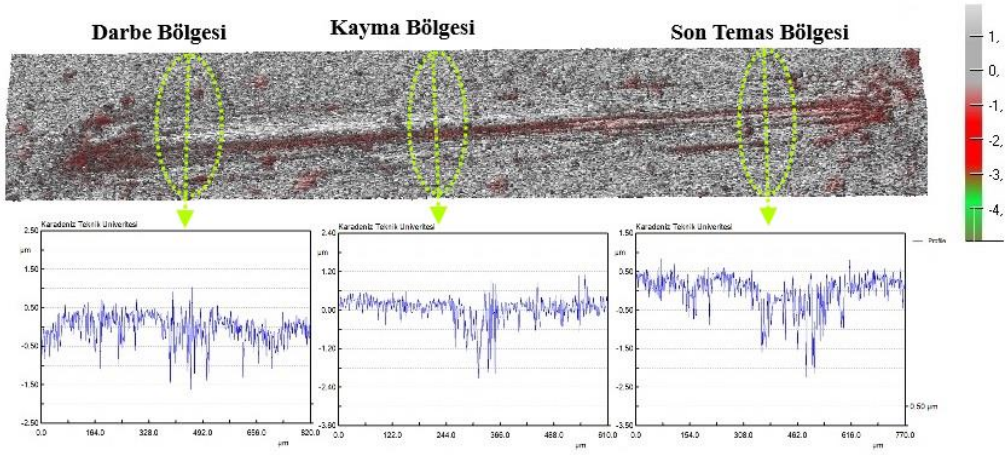
Şekil 132. İşlemsiz Dievar taban malzemesinin darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



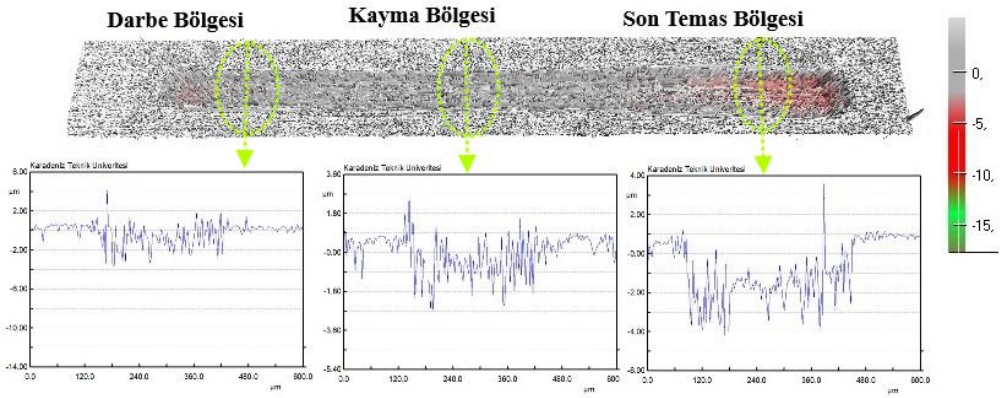
Şekil 133. Nitrürlü Dievar taban malzemesinin darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



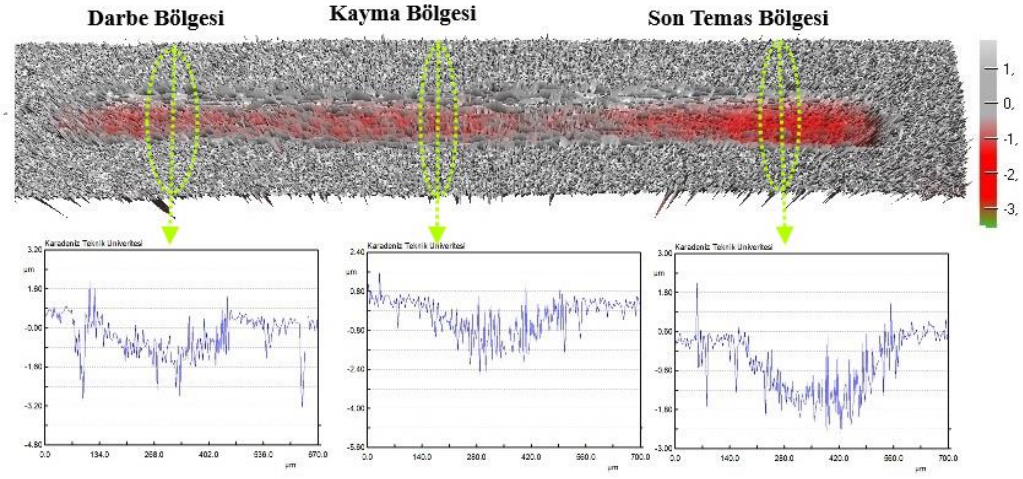
Şekil 134. İşlemsiz Vanadis 23 taban malzemesinin darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



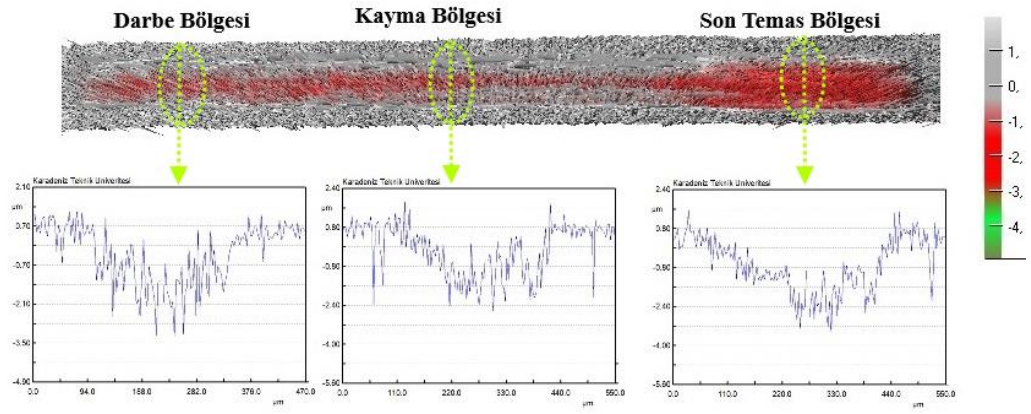
Şekil 135. Nitrürülü Vanadis 23 taban malzemesinin darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



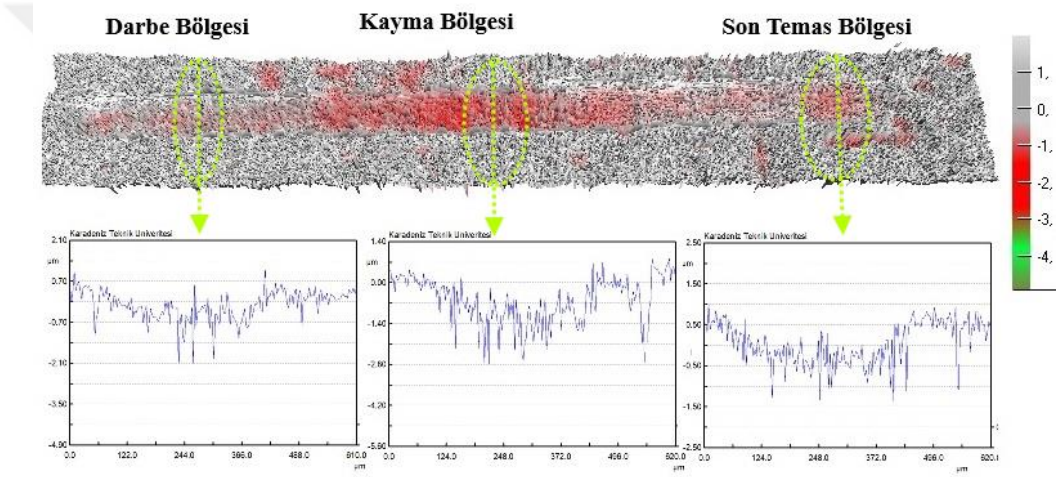
Şekil 136. D-TiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



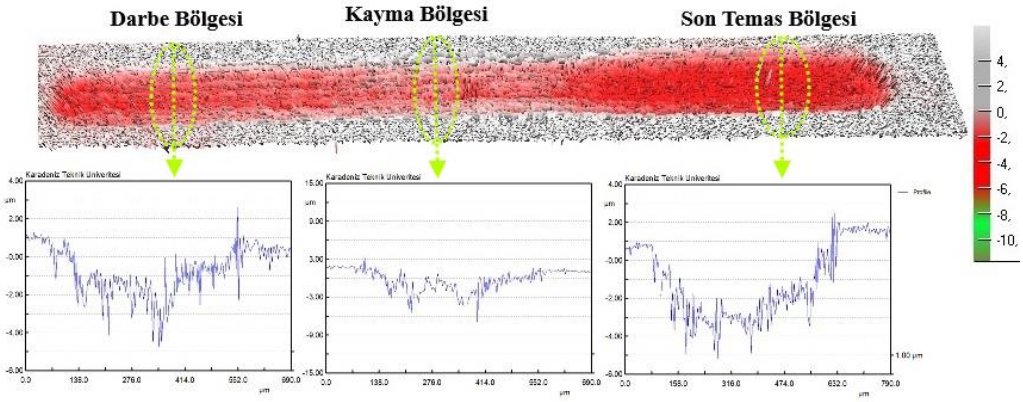
Şekil 137. D-N-TiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



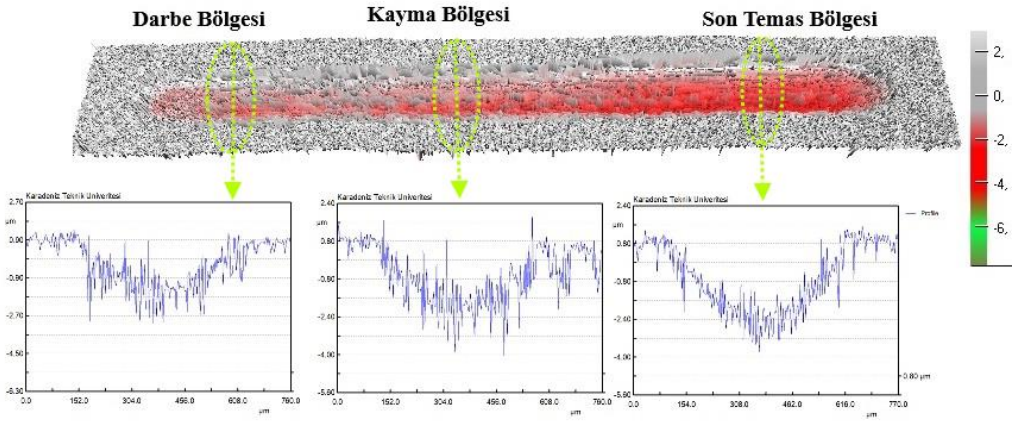
Şekil 138. V-TiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüktüsü



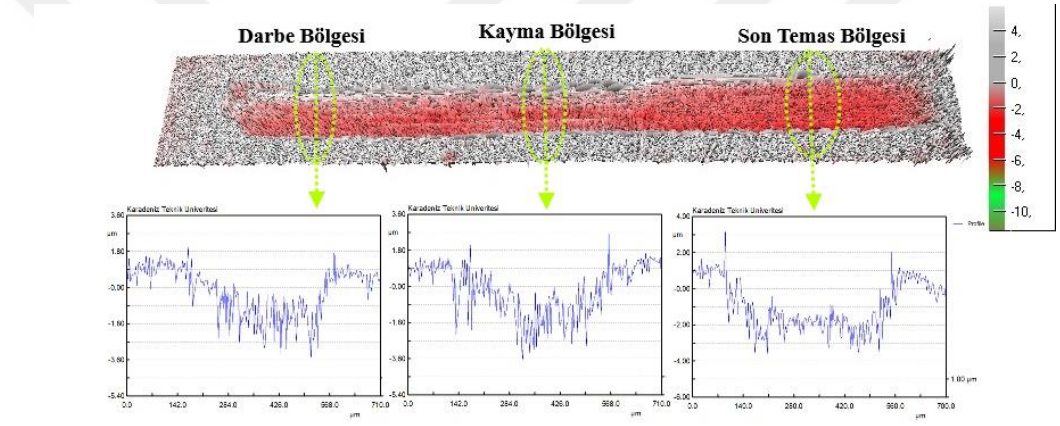
Şekil 139. V-N-TiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



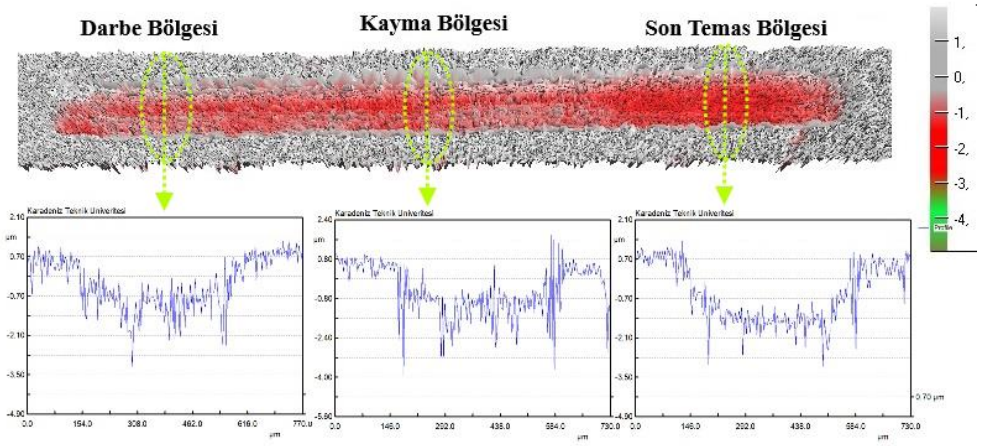
Şekil 140. D-TiAlN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



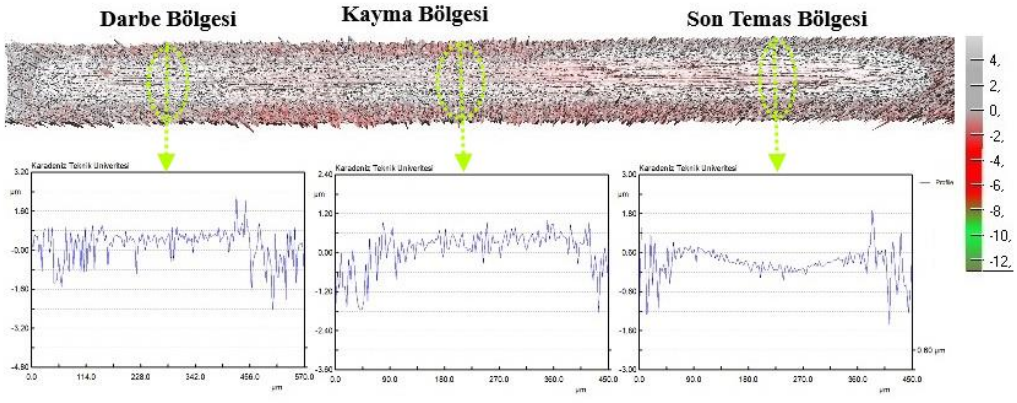
Şekil 141. D-N-TiAlN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



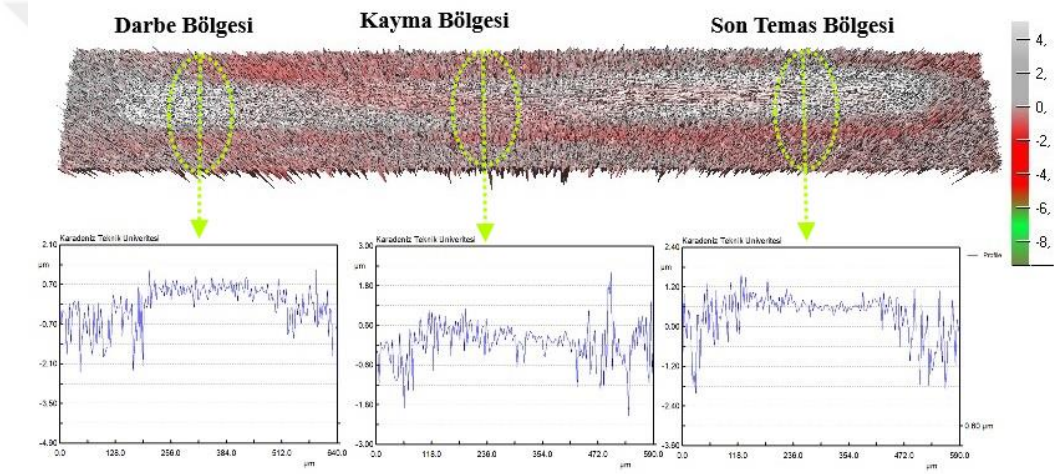
Şekil 142. V-TiAlN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



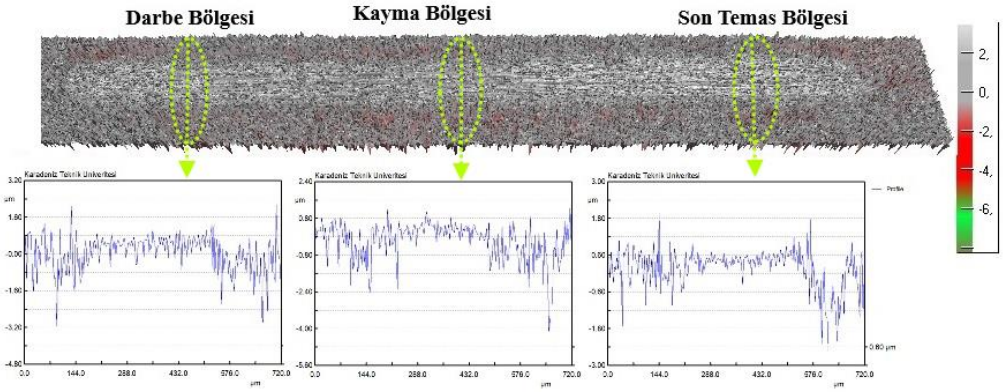
Şekil 143. V-N-TiAlN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



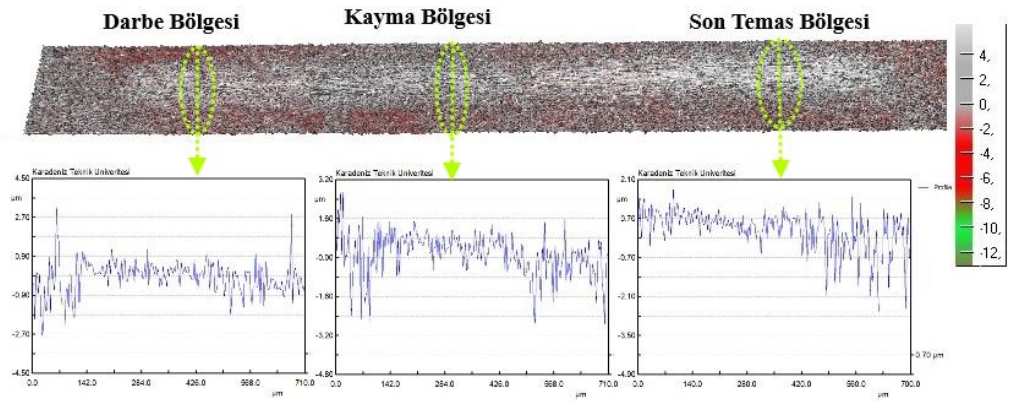
Şekil 144. D-TiCN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



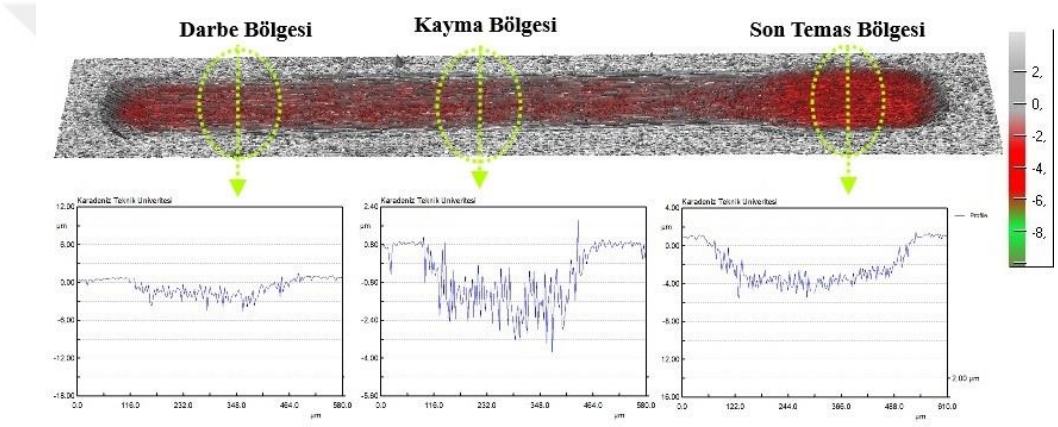
Şekil 145. D-N-TiCN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



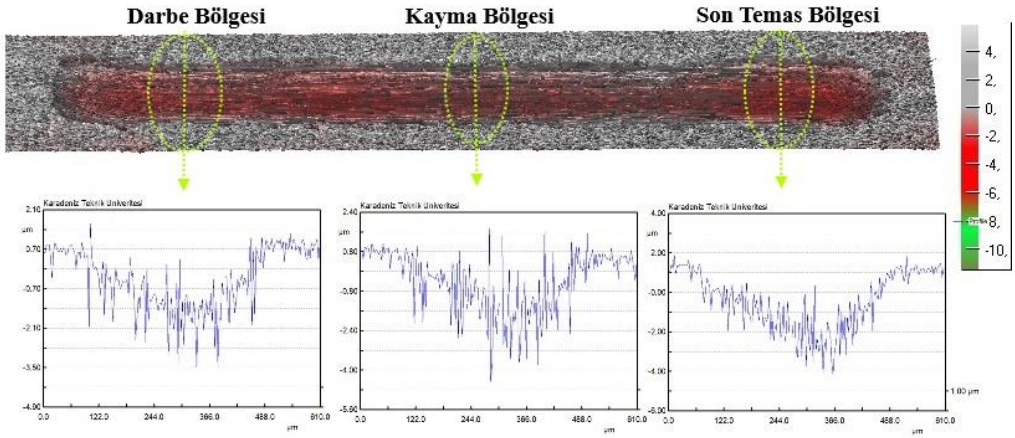
Şekil 146. V-TiCN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



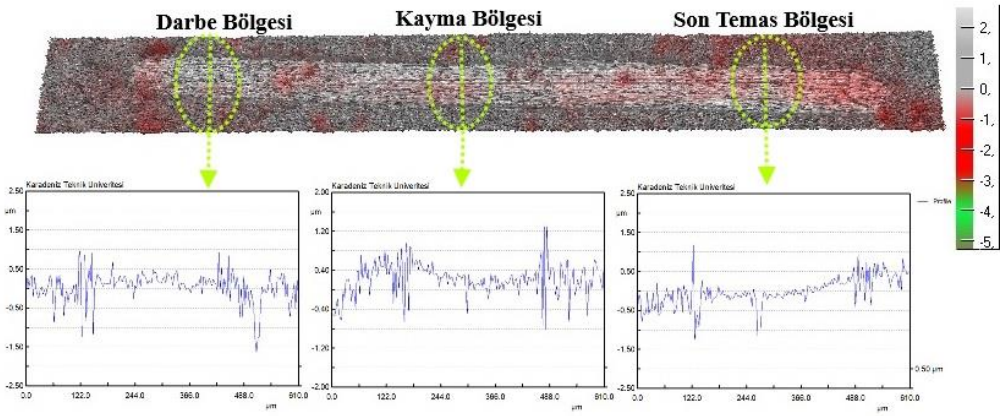
Şekil 147. V-N-TiCN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



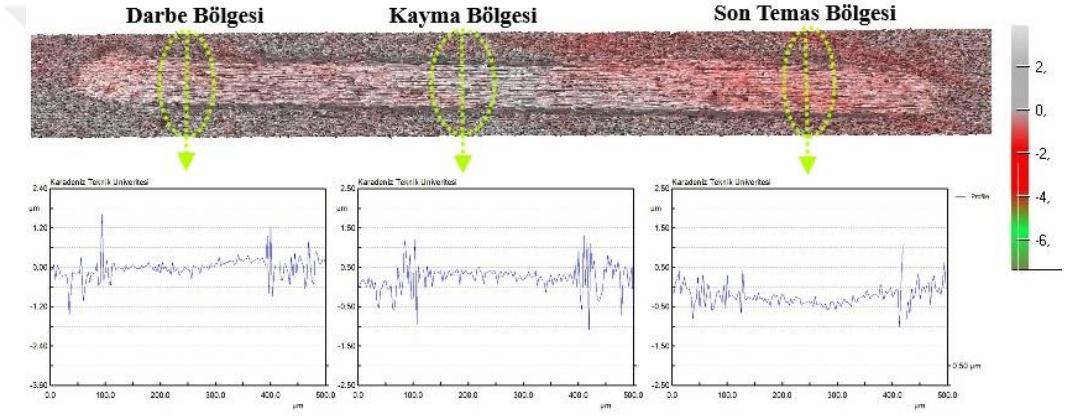
Şekil 148. D-TiSiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



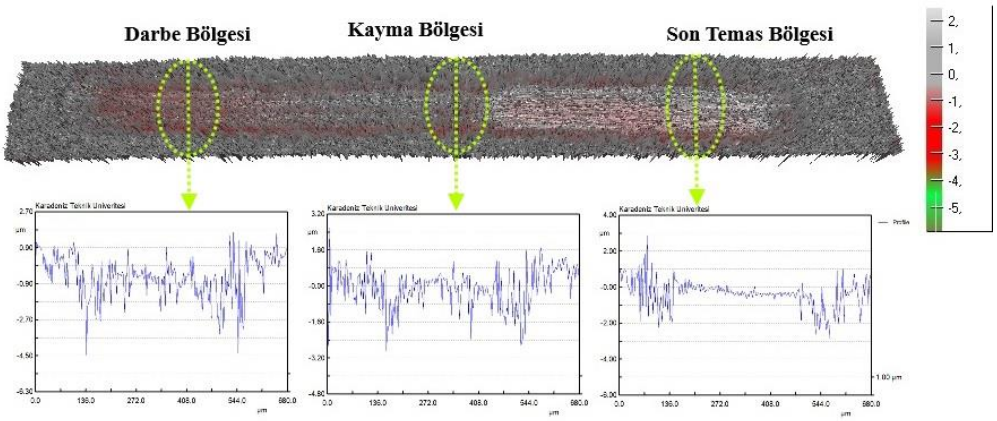
Şekil 149. D-N-TiSiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



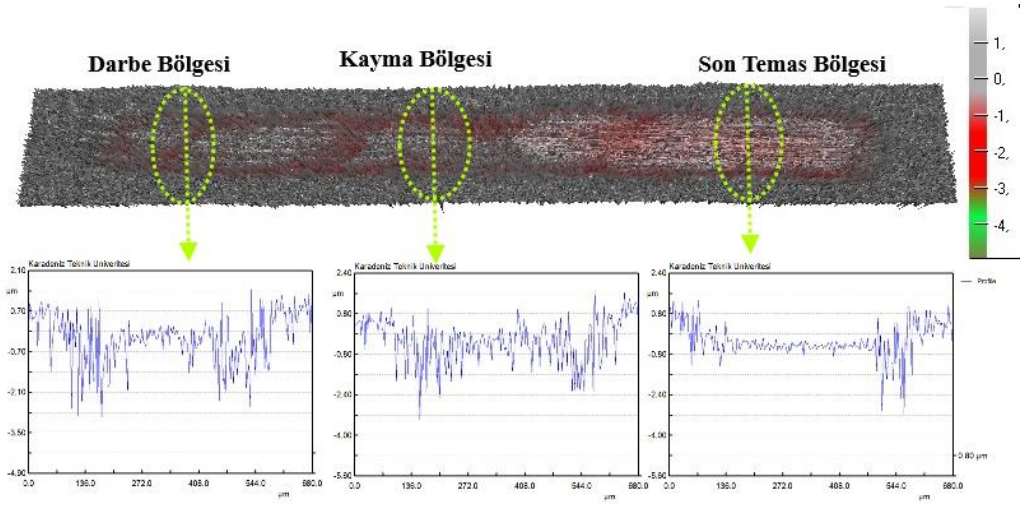
Şekil 150. V-TiSiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



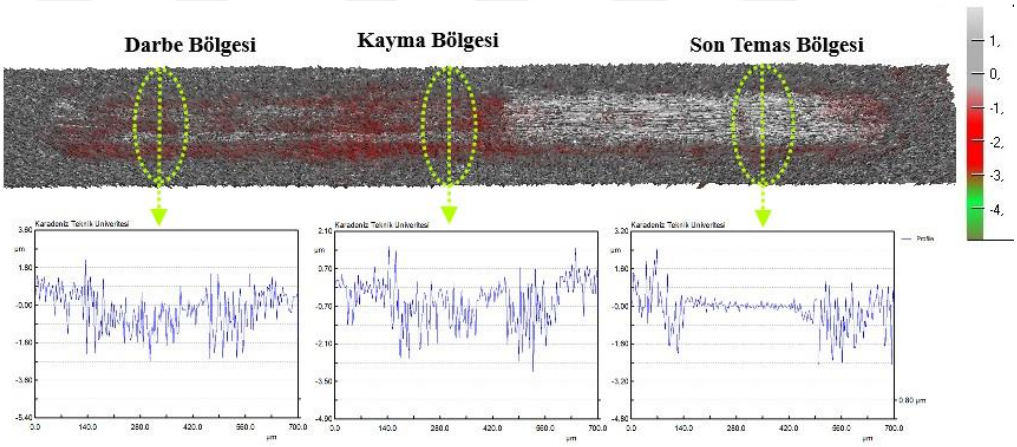
Şekil 151. V-N-TiSiN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



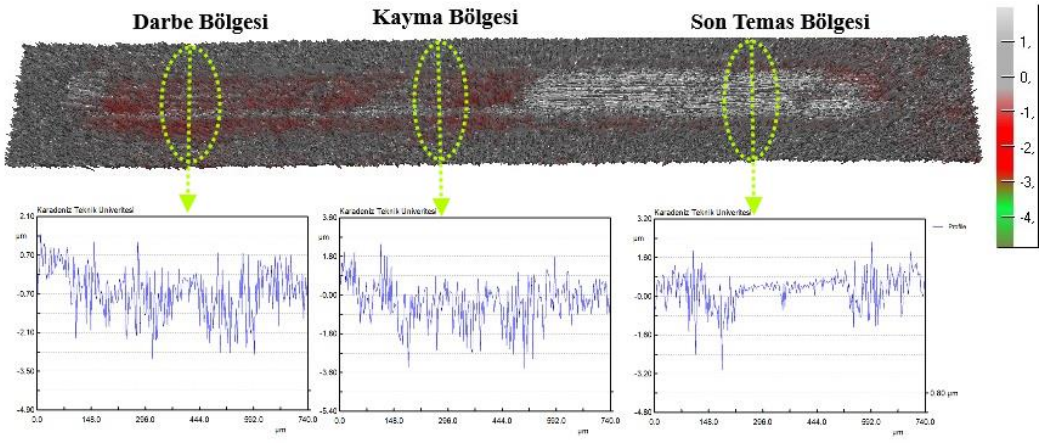
Şekil 152. D-TiAlCrN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



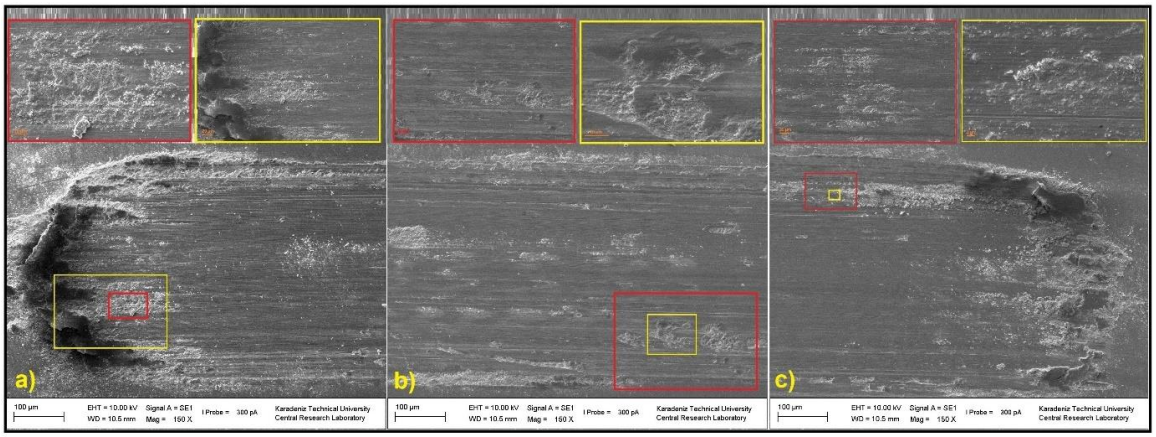
Şekil 153. D-N-TiAlCrN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



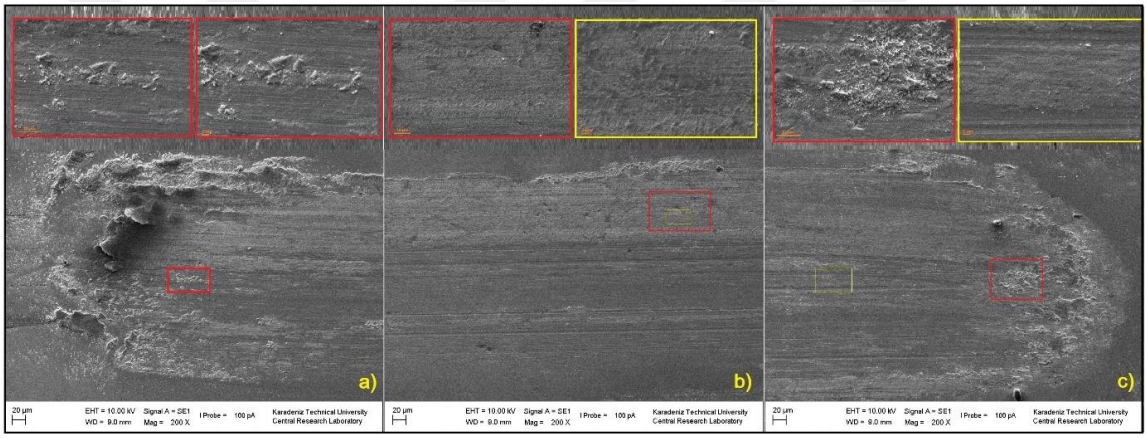
Şekil 154. V-TiAlCrN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



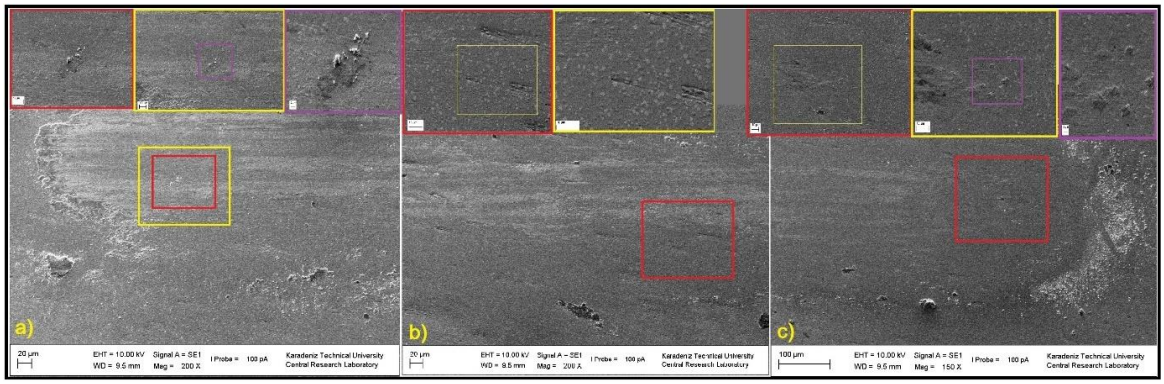
Şekil 155. V-N-TiAlCrN kaplamanın darbeli-kayma aşınma izinin profilometre görüntüsü



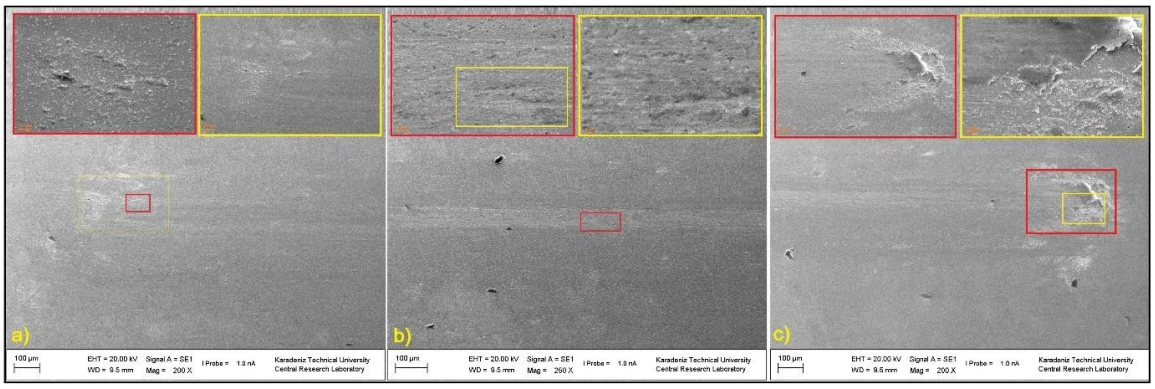
Şekil 156. Dievar numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



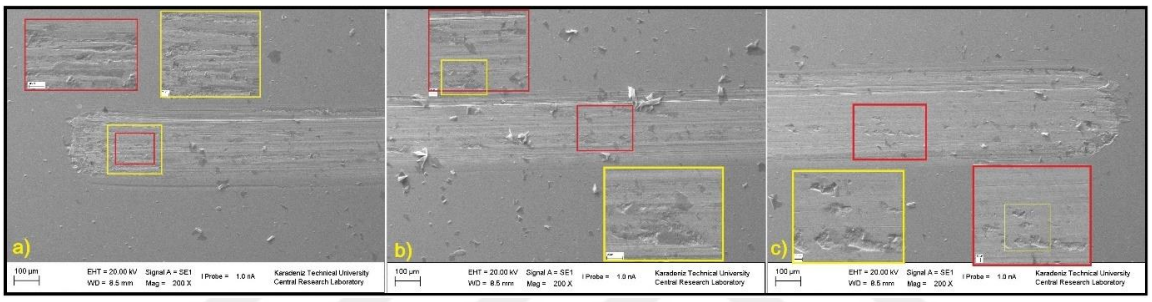
Şekil 157. Dieavr-N numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



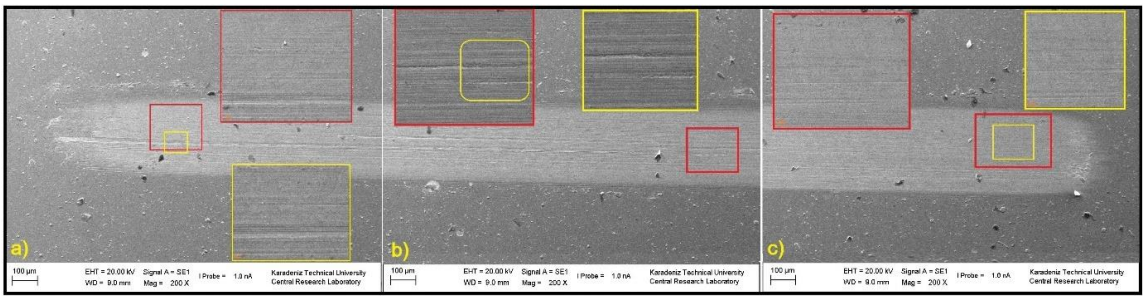
Şekil 158. Vanadis numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



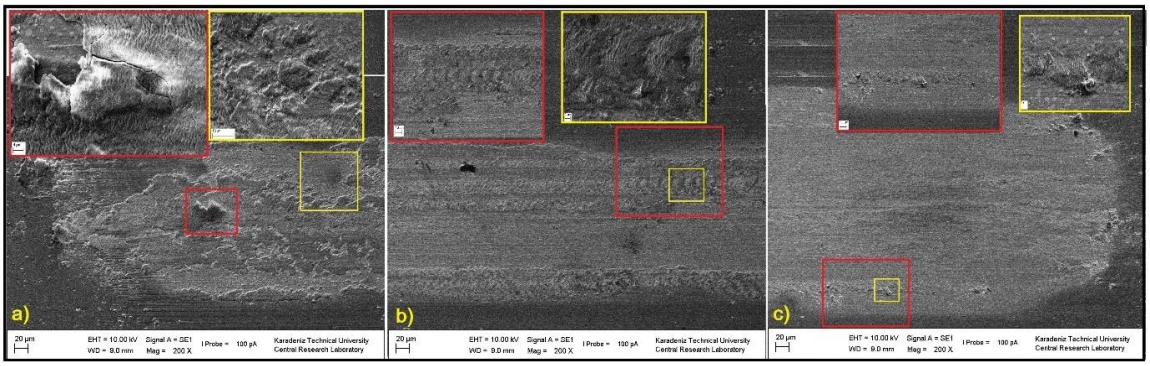
Şekil 159. Vanadis-N numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



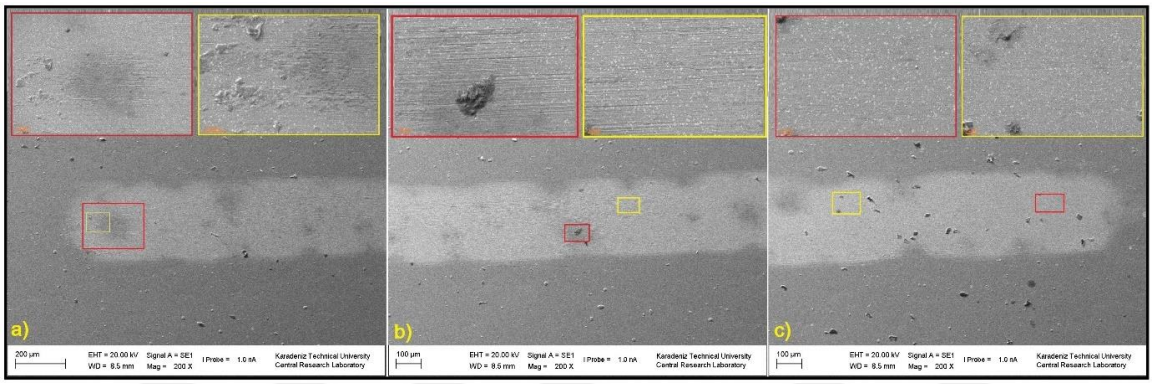
Şekil 160. D-TiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



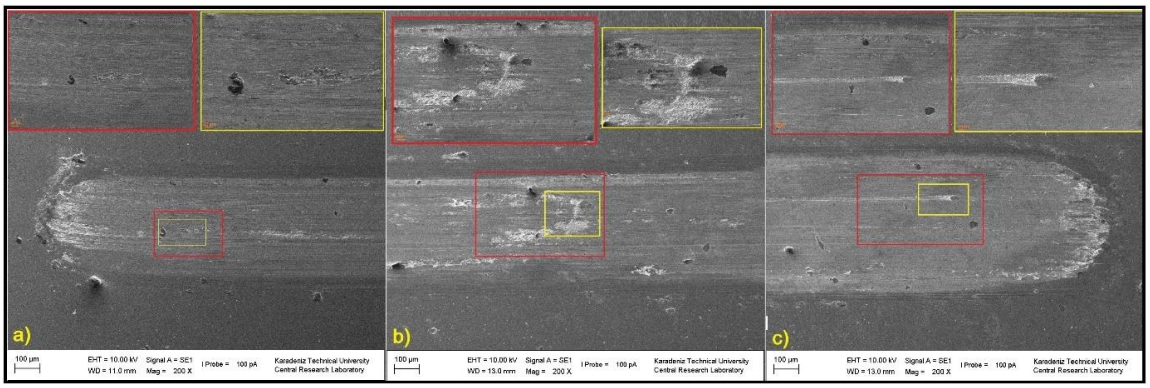
Şekil 161. D-N-TiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



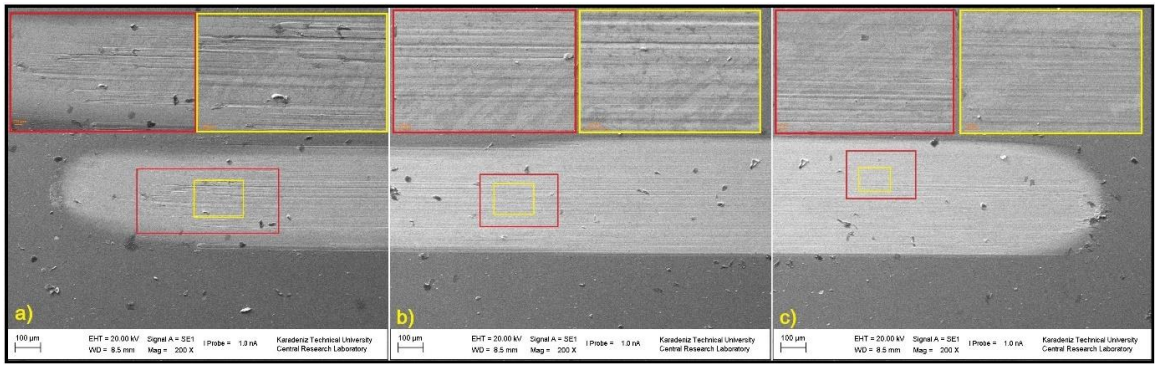
Şekil 162. V-TiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



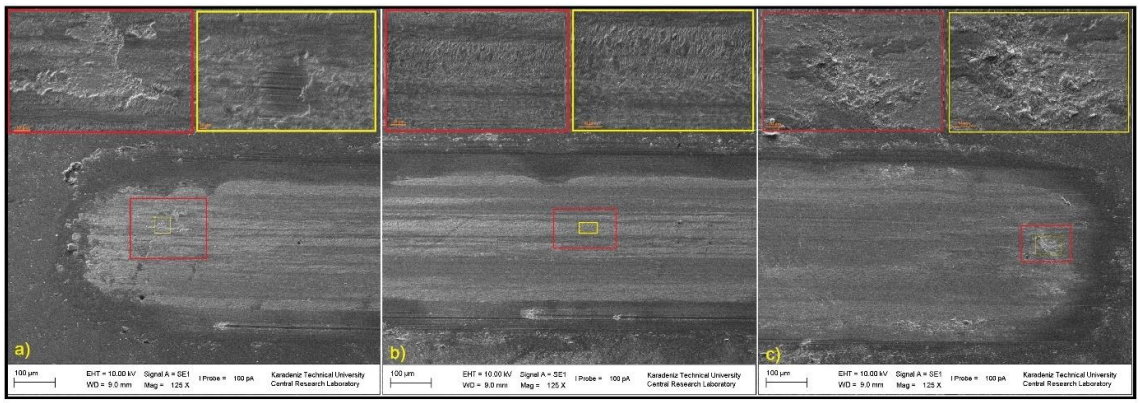
Şekil 163. V-N-TiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



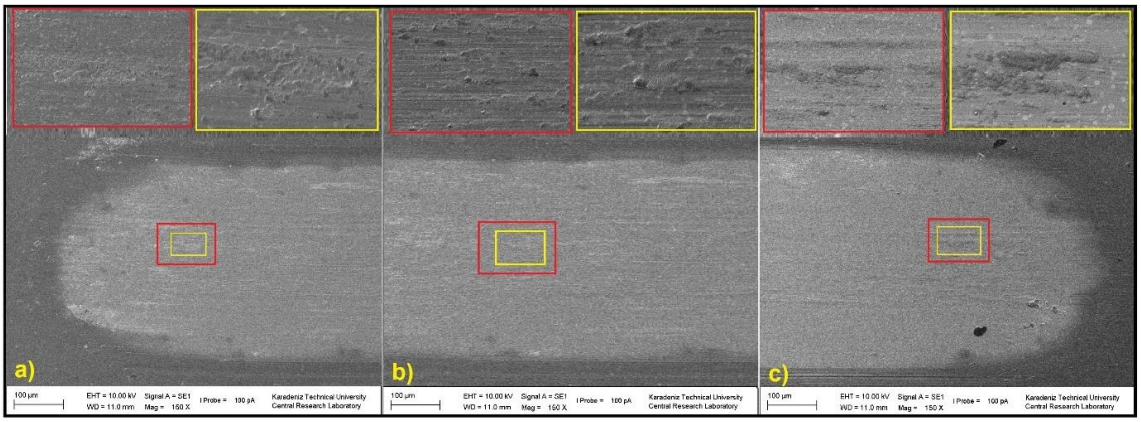
Şekil 164. D-TiAlN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



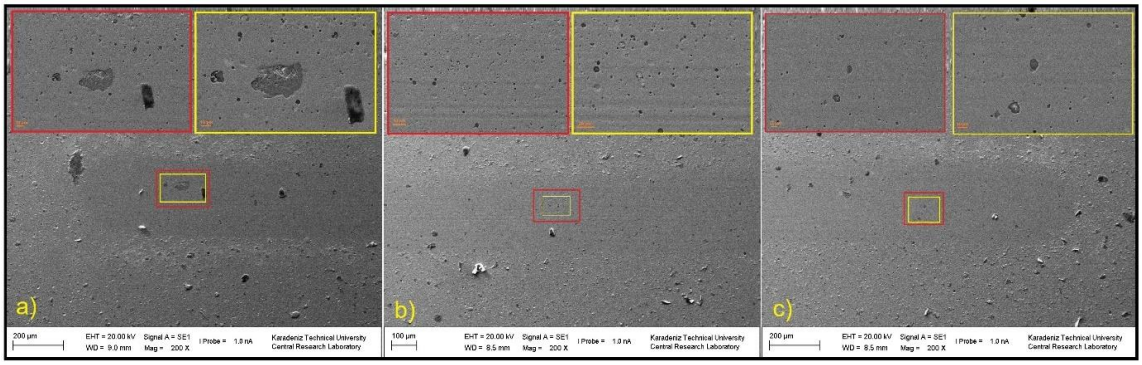
Şekil 165. D-N-TiAlN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



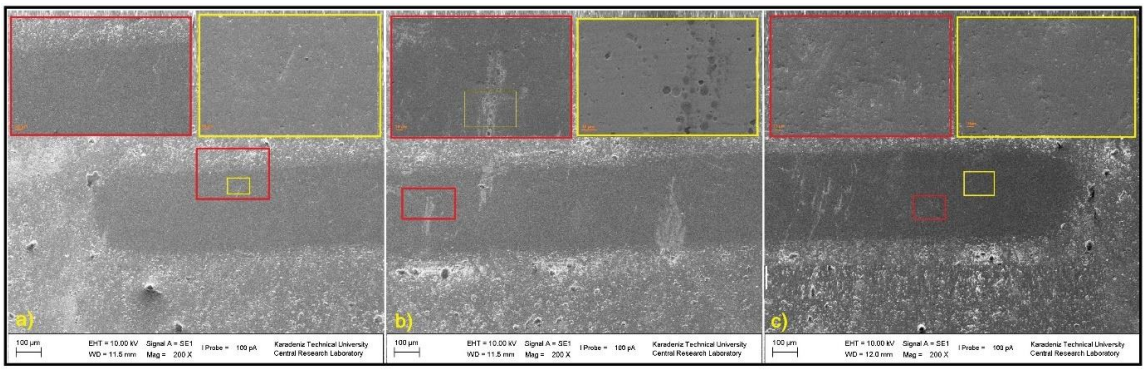
Şekil 166. V-TiAlN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



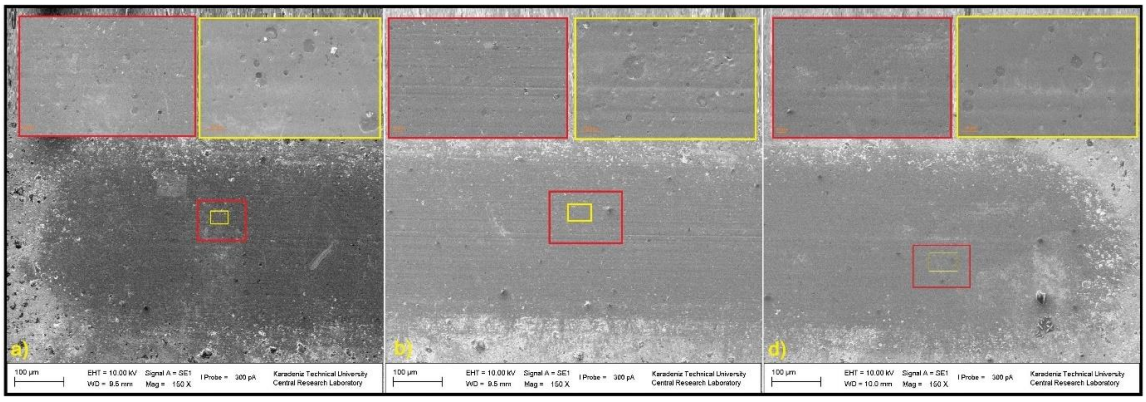
Şekil 167. V-N-TiAlN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



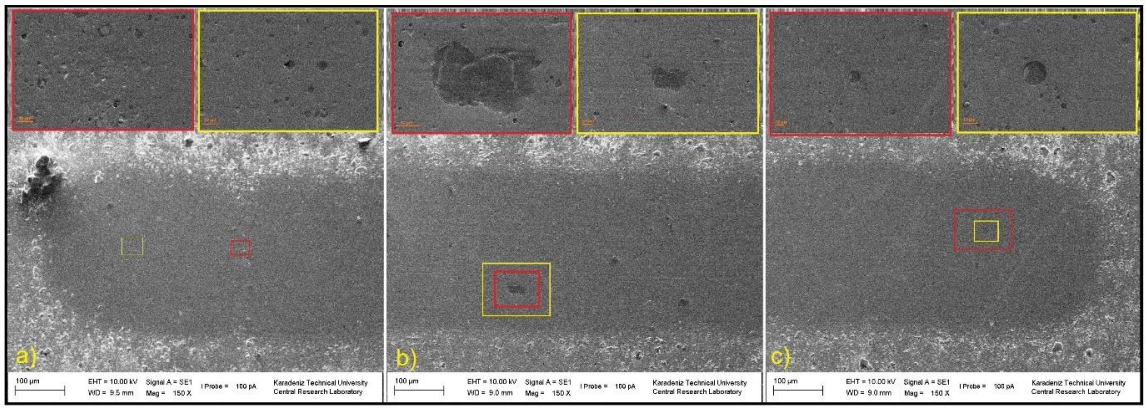
Şekil 168. D-TiCN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



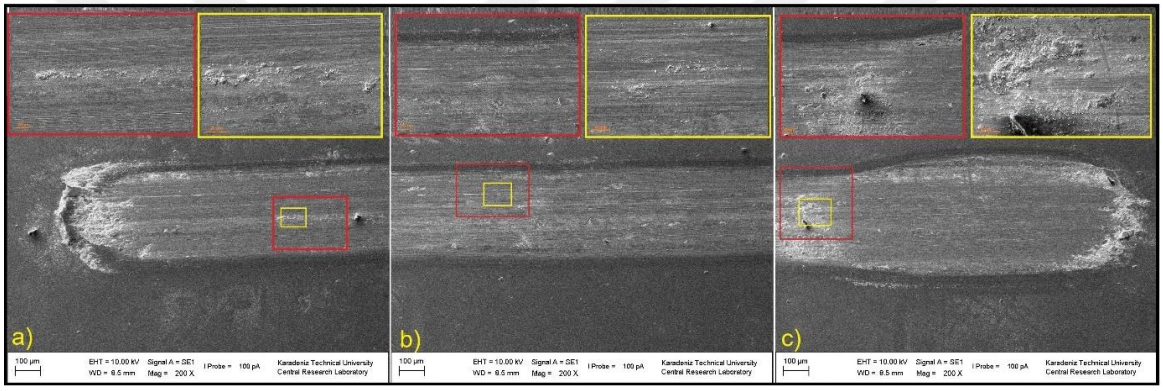
Şekil 169. D-N-TiCN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



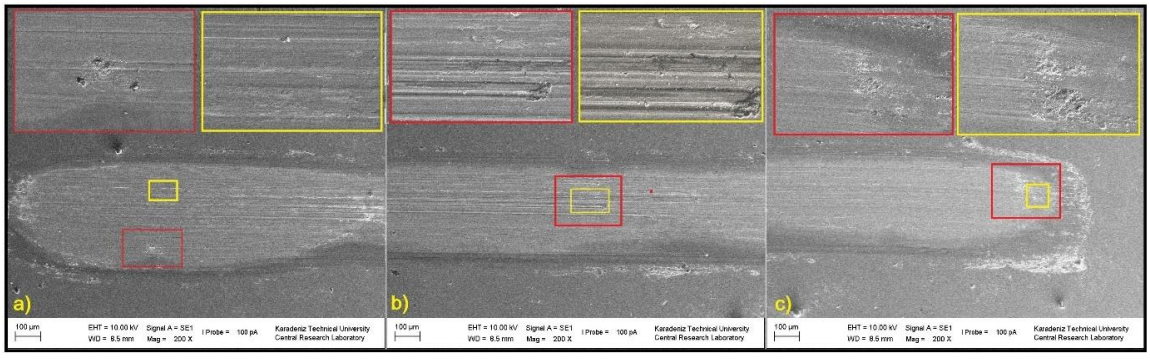
Şekil 170. V-TiCN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



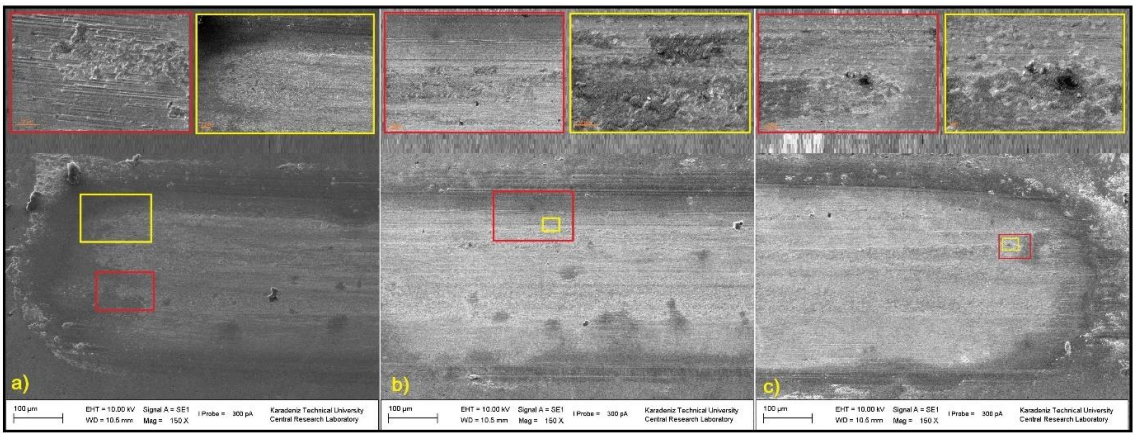
Şekil 171.V-N-TiCN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



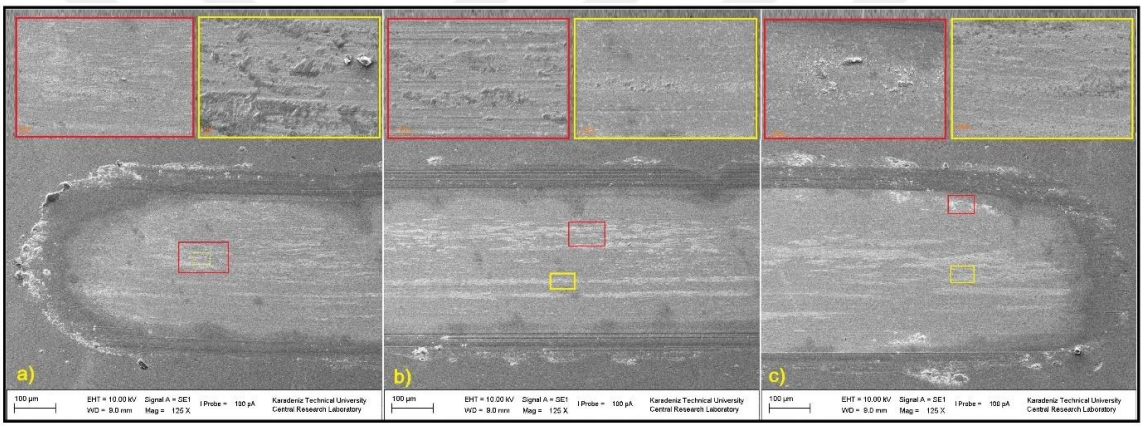
Şekil 172. D-TiSiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



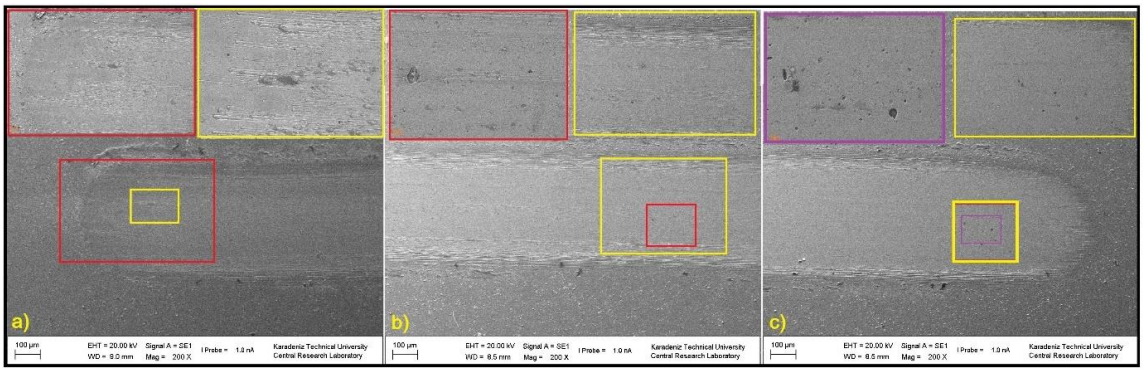
Şekil 173. D-N-TiSiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



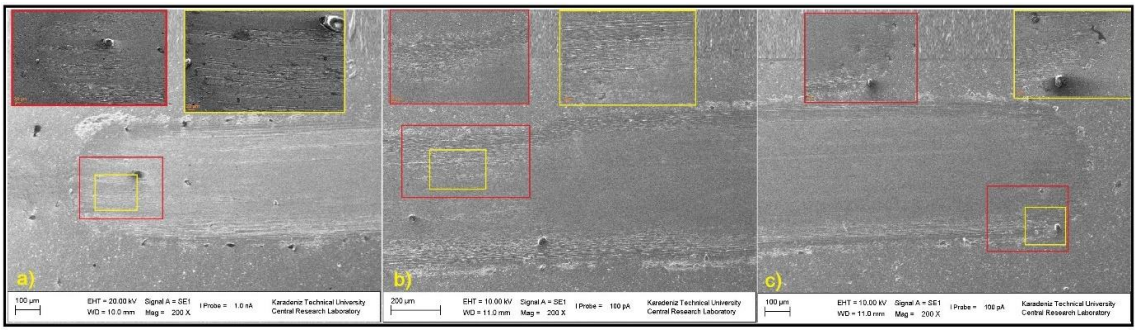
Şekil 174. V-TiSiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



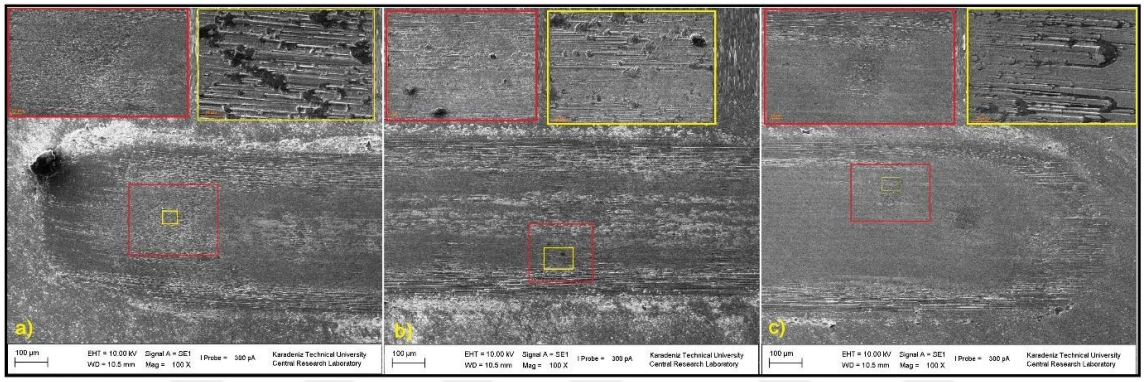
Şekil 175. V-N-TiSiN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



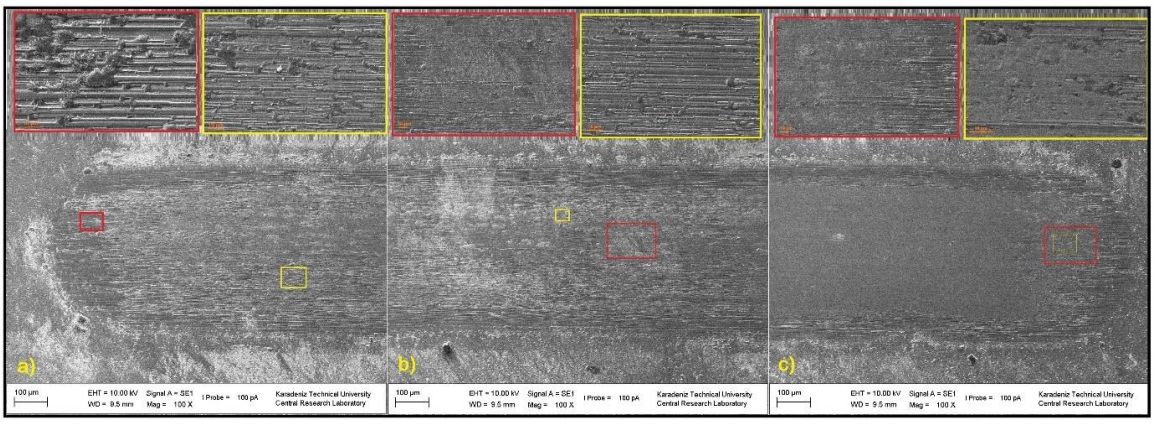
Şekil 176. D-TiAlCrN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



Şekil 177. D-N-TiAlCrN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



Şekil 178. V-TiAlCrN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi



Şekil 179. V-N-TiAlCrN numunesine ait darbe-kayma izinin SEM görüntüsü: a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi, c) Son temas bölgesi

Darbe-kayma testi sonucunda Dievar taban malzemesinde (Şekil 156), darbe bölgesinde belirgin plastik deformasyon, malzeme yığılmaları (darbe-kayma izinin kenarlarına doğru yığınlanma) ve oluklanma aşınması görülmektedir. Orta bölgede

tekrarlayan yüklemenin etkisiyle yüzeysel mikro-çatlak başlangıçları oluşmakta, çıkış bölgesinde ise üçüncü cisim etkisine bağlı ek malzeme kaldırma gözlenmektedir. Bu morfoloji, ilgili yüksek hacim kaybı değerleriyle uyumludur (Şekil 150-153). Nitrürlenmiş Dievar'da (Şekil 157), sert nitrür tabakası plastik deformasyonu belirgin biçimde sınırlamış, yığılmalar ve derin deformasyonlar azalmıştır. Orta bölgede oluklanma aşınması daha yüzeysel görünmektedir, mikro-çatlaklar ve çukurcuklar yer yer görülse de malzeme kaybı kaplamasız yüzeye kıyasla düşüktür. Vanadis 23 tabanında (Şekil 158) karbürce zengin sert yapı nedeniyle plastik deformasyon oldukça sınırlıdır. Paralel çizikler abrazif mekanizmanın baskın olduğunu göstermekte, ancak olukların ince ve düzenli oluşu karbür fazlarının yük taşıma kapasitesiyle ilişkilendirilmektedir. Çıkış bölgesinde üçüncü cisim etkisi zayıf olup malzeme kaybı düşük seviyededir. Nitrürlü Vanadis 23'te (Şekil 159) nitrür tabakası deformasyonu daha da sınırlandırmıştır. TiN kaplamalar (Şekil 160-163), kaplamasız yüzeylerdeki plastik deformasyon, yığılmalar ve derin oluklanmayı önemli ölçüde azaltmıştır. Nitrürlü taban üzerinde TiN uygulandığında giriş bölgesindeki malzeme kaldırma daha da düşmektedir; ancak bazı mikro-çatlak odaklarının tamamen kaybolmadığı anlaşılmaktadır. Darbe etkisiyle kopan parçacıklar iz boyunca üçüncü cisim gibi hareket ederek özellikle orta ve çıkış bölgelerinde aşınmayı artırmakta, bu süreçte yorulma, abrazif ve adezif mekanizmalar birlikte etkili olmaktadır. TiAlN kaplamalarda (Şekil 164-167), giriş bölgesinde plastik deformasyon ve yığılmalar büyük ölçüde bastırılmış, çizikler daha düzenli ve yüzeysel hâle gelmiştir. TiAlN'in sertliği ve kimyasal kararlılığı, darbe enerjisinin kontrollü dağılmasına katkı sağlamaktadır. Nitrürlü tabanda deformasyon daha da azalmış olup oluklanma aşınması yüzeysel seyretmektedir. Mikro-çatlaklar ve üçüncü cisim parçacıkları yalnızca üst tabakada kalmakta, alt yapıya ilerlememektedir. TiCN kaplamalarda (Şekil 168-171), yüksek sertlik, kalın tabaka ve kimyasal bileşim özellikleri sayesinde deformasyonlar belirgin şekilde sınırlanmıştır. Plastik deformasyon ve yığılmalar belirgin şekilde azalmıştır. İz başlangıçları yüzeysel kalmıştır. Oluklanma aşınması süreklilik göstermemekte ve mikro-çatlaklar tabaka bütünlüğünü bozacak seviyeye ulaşmamaktadır. Özellikle nitrürlü tabanda TiCN kombinasyonu oldukça kararlı bir yüzey davranışı sergilemekte, bu durum hacim kaybı verileriyle uyumludur. TiSiN kaplamalarda (Şekil 172-175), Dievar üzerinde plastik deformasyon ve derin oluklar önemli ölçüde azalırken, izler sığ ve kontrollü ilerlemiştir. Nitrürlü Dievar'da deformasyon daha da sınırlanmış, mikro-çatlaklar yüzeysel düzeyde kalmıştır. Vanadis 23 tabanında çizikler sığ ve düzenli olup, üçüncü cisim etkisi bölgesel olarak gözlenmektedir. Nitrürlü Vanadis 23-

TiSiN kombinasyonunda ise çizikler yüzeysel kalmış ve malzeme kaldırma minimum düzeye inmiştir. TiAlCrN kaplamalar (Şekil 176-179), kaplamasız yüzeylerdeki plastik deformasyon, yığılmalar ve derin oluklanmayı gidermiş; çizikler daha yüzeysel ve düzenli hâle gelmiştir. Ancak darbe sonrası başlangıç bölgesinde kaplamadan kopan parçacıklar üçüncü cisim oluşturarak aşınmayı artırmıştır. Aşınma esas olarak abrazif ve adezif karakterdedir.

Genel olarak SEM gözlemleri ve hacim kaybı verileri birlikte değerlendirildiğinde, kaplama ve nitrürleme işlemlerinin darbe-kayma koşullarında yüzey deformasyonlarını önemli ölçüde sınırlandırdığı anlaşılmaktadır. TiN ve TiAlN kaplamalar deformasyonu yüzeysel hâle getirse de üçüncü cisim etkisi ve lokal mikro-çatlaklar aşınmaya katkı sunmuştur. Bununla birlikte, darbe sonrası kopan parçacıkların üçüncü cisim olarak davranması, tüm sistemlerde abrazif ve adezif mekanizmaların farklı düzeylerde etkinliğini sürdürdüğünü göstermektedir.

4. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, Dievar ve Vanadis 23 çeliklerinin teriboloji davranışlarını iyileştirmek amacıyla TiN, TiAlN, TiCN, TiSiN ve TiAlCrN kaplamaları katodik ark PVD yöntemi ile uygulanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, kaplama özelliklerinin (sertlik, kalınlık, pürüzlülük, adeziyon ve sürtünme katsayısı) darbe-aşınma performansı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucunda ulaşılan temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

• Dievar ve Vanadis 23 çeliklerine uygulanan nitrürleme + PVD (TiN, TiAlN, TiCN, TiSiN, TiAlCrN) kombinasyonları, başarıyla kaplandı.

• Kaplama kalınlıklarının incelenmesiyle TiCN kaplamalarının en yüksek, TiN kaplamalarının ise en düşük kalınlıklara sahip olduğu belirlenmiştir.

• XRD sonuçları, kaplamalarda TiN, TiAlN, TiCN, TiSiN ve TiAlCrN için beklenen fazların oluştuğunu doğrulamaktadır.

• Nitrürleme işlemi, başarı bir şekilde taban malzemeler üzerine yapıldı ve sertlik ve tribolojik davranışlarını etkiledi. Sertlik yaklaşık 1,5 kat artmaktadır.

• Nanosertlik sıralaması: En sert TiAlCrN, TiSiN ve TiCN (Dievara göre 5 kat artış ve Vanadis 23'e göre en az 3 kat sertlik değerler artmaktadır) ve en düşük seviyede olan TiN 3-1,5 kat arası artış sağlamış.

• Adezyon dayanımı açısından en yüksek Lc_2 değeri TiCN-Vanadis tabanında 105,5 N olarak elde edilirken, en düşük değer nitrürlenmiş Vanadis 23 üzerindeki TiAlN kaplamasında 43,5 N olarak belirlenmiştir.

• Çalışmada en düşük sürtünme katsayısı TiCN kaplamalarda ($\mu \approx 0{,}19–0{,}23$) ve en yüksek sürtünme katsayısı TiSiN kaplamalarda ($\mu \approx 0{,}35\text{-}0{,}38$) kaydedilmiştir.

• TiCN -Dievar, en iyi aşınma performanslı olarak taban malzemeye göre aşınma performansı yaklaşık 20 kat iyileşmiştir.

• Darbe-kayma aşınmasında 73 kat TiCN-N taban malzemeye göre bir aşınma fark gösterir, bu değer Vanadis 23 için 17 kat olur.

• TiAlN tababakası Dievar çeliğinde en az performanslı (1,5 kat aşınma performans artışı) Darbeli- kayma deneyinde tesbit edilmiştir.

• TiN tababakası Dievar çeliğinde en düşük performanslı (1,5 kat artış Dievar tabana göre) sayılmaktadır.

• Nuumunelerde gözlemlenen aşınma sert ve kırılgan kaplamalarda mekanizmasında üçüncü cisim etkisinde mikro-abrazif çiziklerin etkin olduğu görünür.

• Endüstriyel uygulamalarda artan kalıp ömrü kullanılacak takımların bakım maliyetlerinin azalmasınaetki eder.

Sonuç olarak, bu tez, Dievar ve Vanadis 23 temelli sistemlerde nitrürleme ile desteklenmiş çok bileşenli PVD kaplamaların, özellikle TiSiN ve TiCN, tribolojik korumayı belirgin biçimde artırdığını ve sürtünme ve hacim kaybının düşürüldüğünü göstermiştir. Elde edilen ilkeler, dövme ve yüksek yük altında çalışan takım elemanlarının hizmet ömrünü artırmaya ve bakım yenileme maliyetlerini azaltmaya doğrudan katkı sağlayacak niteliktedir.

5. ÖNERİLER

Doktora tezi kapsamında Dievar ve Vanadis 23 çelikleri üzerine uygulanan nitrürleme ve TiN esaslı çok bileşenli PVD kaplamaların mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiş; hibrit yapının aşınma direncine katkısı ortaya konmuştur. Bu çalışmaya benzer araştırmalar yapacaklar için öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Endüstriyel uygulamalarda kullanılan takımların yüksek sıcaklıklara maruz kalması nedeniyle, aşınma testlerinin yüksek sıcaklıkta yapılması yararlı olacaktır.
- Yağlayıcı ortamın aşınma direncine etkisi incelenmeli; farklı yağlayıcı türlerinin aşınma davranışı üzerindeki rolü araştırılmalıdır.
- Çalışmada en iyi aşınma direnci gösteren TiCN ve TiSiN kaplamaların farklı kaplama yöntemleri ile üretilip, mevcut sonuçlarla kıyaslanmalıdır.

6. KAYNAKLAR

Akbal, T. (2014). *Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemiyle Yapılan Alüminyum Krom Nitrür (AlCrN) İnce Film Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu.*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Aktarer, S. M. (2024). Tribological properties under dry and lubricated sliding conditions of TiSiN and AlTiCrN coatings deposited on gray cast iron. *Surfaces and Interfaces*, *52*. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.104948

Aktaş Çelik, G., Fountas, K., Atapek, Ş. H., Polat, Ş., Kamoutsi, E., & Zervaki, A. D. (2024). Investigation of the Nitriding Effect on the Adhesion and Wear Behavior of CrN-, AlTiN-, and CrN/AlTiN-Coated X45CrMoV5-3-1 Tool Steel Formed Via Cathodic Arc Physical Vapor Deposition. *Lubricants*, *12*(5). https://doi.org/10.3390/lubricants12050170

Ali, M., Hamzah, E., Hamid, M. A., & Hashim, A. H. (2023). Whether macro-droplets generate or develop in depositing hard coatings by cathodic arc evaporation technique. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *115*. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106296

Al-Rjoub, A., Cavaleiro, A., Rajput, S. S., & Fernandes, F. (2021). High Si multilayered TiSiN/TiN (Ag) films with superior oxidation resistance. *Journal of Materials Research and Technology*, *12*, 2340-2347. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.040

Altaş, E., Erdogan, A., & Koçyiğit, F. (2019). A comparative study on the high temperature dry sliding wear behavior of TiN and AlTiN/TiSiN coatings fabricated by PVD technique. *Industrial Lubrication and Tribology*, *71*(7), 861-868. https://doi.org/10.1108/ILT-12-2018-0458

Aytaç, A. , & M. U. (2018). *Comparison of PVD and JVD / DVD Thin Film Coatings by Physical Vapor Deposition Methods and a Conceptual, Academic and Theoretical Analysis on Industrial Applications of DVD Coating Technology*.

Azimi Igdir, M. (2016). *Sürtünme karıştırma prosesi kullanılarak yüzeyine SiC parçacık takviye edilen NAB alaşımının tribolojik özelliklerinin incelenmesi.* K.T.Ü.,Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Birol, Y., & İsler, D. (2011). Thermal cycling of AlTiN- and AlTiON-coated hot work tool steels at elevated temperatures. *Materials Science and Engineering: A*, *528*(13-14), 4703-4709. https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.076

Boynueyri, D. (2019). *Pvd yöntemi ile ince kaplanmış kesici takımların mikro ölçekli aşınma testi ile aşınma dayanımının belirlenmesi.* Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın.

Buchmayr, B. (2017). Damage, Lifetime, and Repair of Forging Dies. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, *162*(3), 88-93. https://doi.org/10.1007/s00501-016-0566-3

Bull, S. J., & Berasetegui, E. G. (2006). An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing. *Tribology International*, *39*(2), 99-114. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.04.013

Chander, S., & Chawla, V. (2017). Failure of Hot Forging Dies-An Updated Perspective. Içinde *Materials Today: Proceedings* (C. 4). www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings

Chang, C.-L., Chen, W.-C., Tsai, P.-C., Ho, W.-Y., & Wang, D.-Y. (2007). Characteristics and performance of TiSiN/TiAlN multilayers coating synthesized by cathodic arc plasma evaporation. *Surface and Coatings Technology*, *202*(4-7), 987-992. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.024

Chang, S. H., Shiao, W. Y., & Huang, K. T. (2023). Improvement of the Wear Resistance and Corrosion Properties of CrN Films on Oxynitriding-Treated Vanadis 23 High-Speed Steel by the DC Magnetron Sputtering Process. *Materials Transactions*, *64*(7), 1631-1637. https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2023044

Chen, J., Fang, W., Gobinda, G., Cai, F., Tao, L., & Zhang, S. (2024). Effects of multilayer structure on the high-speed dry-cutting performance of AlCrBN/AlCrN multilayer coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *121*. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.106672

Chen, L., Wang, S. Q., Zhou, S. Z., Li, J., & Zhang, Y. Z. (2008). Microstructure and mechanical properties of Ti(C, N) and TiN/Ti(C, N) multilayer PVD coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *26*(5), 456-460. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2007.10.003

Cheng, Y. H., Browne, T., Heckerman, B., & Meletis, E. I. (2011). Influence of the C content on the mechanical and tribological properties of the TiCN coatings deposited by LAFAD technique. *Surface and Coatings Technology*, *205*(16), 4024-4029. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.02.032

Dennis, J. K., & Mahmoud, E. A. A. G. (1987). Wear resistance of surface-treated hot forging dies. *Tribology International*, *20*(1), 10-17. https://doi.org/10.1016/0301-679X(87)90003-X

Dennis Murwamadala, R., Guthmann, X., & Nohava, J. (t.y.). *Investigation of high-temperature wear behavior of TiN and TiAlN PVD-coated low alloy steel AISI 4140*. https://doi.org/10.1108/ILT-09-2024-0354/Keywords

Devarajan, D. K., Rangasamy, B., & Amirtharaj Mosas, K. K. (2023). State-of-the-Art Developments in Advanced Hard Ceramic Coatings Using PVD Techniques for High-Temperature Tribological Applications. Içinde *Ceramics* (C. 6, Sayı 1, ss. 301-329). MDPI. https://doi.org/10.3390/ceramics6010019

Dobrocky, D., Pokorny, Z., Joska, Z., Sedlak, J., Zouhar, J., Majerik, J., Studeny, Z., Prochazka, J., & Barenyi, I. (2022). Change in Dimensions and Surface Roughness of 42CrMo4 Steel after Nitridation in Plasma and Gas. *Coatings*, *12*(10). https://doi.org/10.3390/coatings12101481

Dobrzański, L. A., Lukaszkowicz, K., Zarychta, A., & Cunha, L. (2005). Corrosion resistance of multilayer coatings deposited by PVD techniques onto the brass substrate. *Journal of Materials Processing Technology*, *164-165*, 816-821. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.081

Emamverdian, A. A., Sun, Y., Cao, C., Pruncu, C., & Wang, Y. (2021). Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies) - a review. *Engineering Failure Analysis*, *129*, 105678. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105678

Figueiredo, M. R. de. (2011). *TiCN hard coatings: tribological performance and deposition process analysis*.

Fox-Rabinovich, G. S., Beake, B. D., Endrino, J. L., Veldhuis, S. C., Parkinson, R., Shuster, L. S., & Migranov, M. S. (2006). Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings. *Surface and Coatings Technology*, *200*(20-21), 5738-5742. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.132

Greene, J. E. (2017). Review Article: Tracing the recorded history of thin-film sputter deposition: From the 1800s to 2017. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, *35*(5). https://doi.org/10.1116/1.4998940

Gui, B., Zhou, H., Zheng, J., Liu, X., Feng, X., Zhang, Y., & Yang, L. (2021). Microstructure and properties of TiAlCrN ceramic coatings deposited by hybrid HiPIMS/DC magnetron co-sputtering. *Ceramics International*, *47*(6), 8175-8183. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.11.175

Hawryluk, M., Dudkiewicz, Ł., Borowski, J., Marzec, J., & Tkocz, R. (2024). Increasing the Working Time of Forging Tools Used in the Industrial Process of Producing a Disk-Type Forging Assigned for a Gearbox through the Application of Hybrid Layers. *Materials*, *17*(12), 3005. https://doi.org/10.3390/ma17123005

Hawryluk, M., Dudkiewicz, Ł., Zwierzchowski, M., Polak, S., Lachowicz, M., Ziemba, J., & Gronostajski, Z. (2024). Influence of the nitriding process on the durability of tools used in the production of automotive forgings in industrial hot die forging processes on hammers. *Materials Science-Poland*, *42*(4), 113-130. https://doi.org/10.2478/msp-2024-0047

Hawryluk, M., Gronostajski, Z., Kaszuba, M., Krawczyk, J., Widomski, P., Ziemba, J., Zwierzchowski, M., & Janik, J. (2018). Wear Mechanisms Analysis of Dies Used in the Process of Hot Forging a Valve Made of High Nickel Steel. *Archives of Metallurgy and Materials*, 1963-1974. https://doi.org/10.24425/amm.2018.125131

Hawryluk, M., Gronostajski, Z., Kaszuba, M., Polak, S., Widomski, P., Ziemba, J., & Smolik, J. (2017). Application of selected surface engineering methods to improve the durability of tools used in precision forging. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *93*(5-8), 2183-2200. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0677-3

Ichimura, H., & Kawana, A. (1993). High-temperature oxidation of ion-plated TiN and TiAlN films. *Journal of Materials Research*, *8*(5), 1093-1100. https://doi.org/10.1557/JMR.1993.1093

Kara, L., Özkan, D., Barış Yağcı, M., Sulukan, E., Sert, Y., & Sonsuz Sert, T. (2019). Friction and Wear Behaviors of TiN Coatings under Dry and Vacuum Conditions. *Tribology Transactions*, *62*(3), 362-373. https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1559385

Khonsari, M. M., Ghatrehsamani, S., & Akbarzadeh, S. (2021). On the running-in nature of metallic tribo-components: A review. Içinde *Wear* (C. 474-475). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203871

Kim, G. S., & Lee, S. Y. (2006). Microstructure and mechanical properties of AlCrN films deposited by CFUBMS. *Surface and Coatings Technology*, *201*(7), 4361-4366. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.076

Kölbl, L. (2025). *Reactive sputter deposition of silver-niobate-based thin films for lead-free dielectric capacitors.* Montan University of Leoben, Chair of Functional Materials and Materials Systems, Doktora Tezi, Leoben.

Kumar, M., Sidpara, A., & Racherla, V. (2022a). Analysis of Tool Wear and Counter Surface Roughness in the Flexible Abrasive Tool Finishing. *Lubricants*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/lubricants10110318

Kumar, M., Sidpara, A., & Racherla, V. (2022b). Analysis of Tool Wear and Counter Surface Roughness in the Flexible Abrasive Tool Finishing. *Lubricants*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/lubricants10110318

Lee, B.-J., Kim, Y.-S., Seo, D.-W., & Choi, J.-W. (2023). The Effect of Deposition Temperature of TiN Thin Film Deposition Using Thermal Atomic Layer Deposition. *Coatings*, *13*(1), 104. https://doi.org/10.3390/coatings13010104

Liu, W., Chu, Q., Zeng, J., He, R., Wu, H., Wu, Z., & Wu, S. (2017). PVD-CrAlN and TiAlN coated Si 3 N 4 ceramic cutting tools —1. Microstructure, turning performance and wear mechanism. *Ceramics International*, *43*(12), 8999-9004. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.04.041

Makówka, M., & Wendler, B. (2017). Carbon based coatings for applications in friction couples with bearing steel and aluminium alloy. *Archives of Materials Science and Engineering*, *1*(87), 12-20. https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.5966

Maksakova, O., Smyrnova, K., Ludrovcová, B., Sahul, M., Haršáni, M., Truchlý, M., Sahul, M., Vopát, T., Pašák, M., Kozak, A., & Pogrebnjak, A. (2025). Tribological and micromechanical performance of hard yet tough TiSiN/WN coatings: An experimental analysis of multilayer effects. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *131*. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107212

Martin, P. M. (2010). *Handbook of deposition technologies for films and coatings: Science, applications and technology* (3. baskı). William Andrew Publishing.

Mattox, D. M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing* (2. baskı). William Andrew Publishing.

Mattox, D. M. . (2003). *The foundations of vacuum coating technology*. Noyes Publications: William Andrew Pub.

Moskalewicz, T., Wendler, B., Zimowski, S., Dubiel, B., & Czyrska-Filemonowicz, A. (2010). Microstructure, micro-mechanical and tribological properties of the nc-WC/a-C nanocomposite coatings magnetron sputtered on non-hardened and oxygen hardened Ti–6Al–4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, *205*(7), 2668-2677. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.10.039

Moskalewicz, T., Zimowski, S., Wendler, B., Progalskiy, I., & Czyrska-Filemonowicz, A. (2015). Microstructure and properties of thick nanocomposite TiN/Si3N4 coatings on Vanadis 23 HS steel. *International Journal of Materials Research*, *106*(7), 732-740. https://doi.org/10.3139/146.111223

Movassagh-Alanagh, F., Abdollah-zadeh, A., Aliofkhazraei, M., & Abedi, M. (2017). Improving the wear and corrosion resistance of Ti–6Al–4V alloy by deposition of TiSiN nanocomposite coating with pulsed-DC PACVD. *Wear*, *390-391*, 93-103. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.009

Naghdali, S., Schiester, M., Terziyska, V., Hans, M., Primetzhofer, D., Pohler, M., Czettl, C., Tkadletz, M., & Schalk, N. (2025). Investigation of nanocomposite formation in TiSiN coatings using atom probe tomography. *Surface and Coatings Technology*, *513*, 132535. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2025.132535

Navinsek, B., Panjan, P., Gorenjak, F., & Stefan, J. (2001). Improvement of hot forging manufacturing with PVD and DUPLEX coatings. Içinde *Surface and Coatings Technology* (C. 137).

Nojit, T., Visuttipitukul, P., & Taweesup, K. (2021). Thermal oxidation resistance of quaternary TiAlCrN coatings prepared with cathodic arc evaporation. *Journal of the Australian Ceramic Society*, *57*(4), 1209-1218. https://doi.org/10.1007/s41779-021-00617-x

Oktay, G. (2007). *Katodik ark FBB yöntemi ile Ti6Al4V altlık malzemesi üzerine kaplanmış magnezyumun morfolojisine bias geriliminin etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Ohring, M. (2002). *Materials science of thin films: Deposition and structure*.

Panjan, P., Drnovšek, A., Gselman, P., Čekada, M., & Panjan, M. (2020a). Review of growth defects in thin films prepared by PVD techniques. Içinde *Coatings* (C. 10, Sayı 5). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/COATINGS10050447

Panjan, P., Drnovšek, A., Gselman, P., Čekada, M., & Panjan, M. (2020b). Review of Growth Defects in Thin Films Prepared by PVD Techniques. *Coatings*, *10*(5), 447. https://doi.org/10.3390/coatings10050447

Pişken, B. (2007). *Titanyum ve alaşımlarının termal oksidasyon özelliklerine TiN kaplamanın etkilerinin incelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Podgornik, B., & Leskovšek, V. (2015). Wear mechanisms and surface engineering of forming tools. Içinde *Materiali in Tehnologije* (C. 49, Sayı 3, ss. 313-324). Institute of Metals Technology. https://doi.org/10.17222/mit.2015.005

Podgrajšek, M., Glodež, S., & Ren, Z. (2015). Failure analysis of forging die insert protected with diffusion layer and PVD coating. *Surface and Coatings Technology*, *276*, 521-528. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.06.021

Polcar, T., & Cavaleiro, A. (2014). High temperature behavior of nanolayered CrAlTiN coating: Thermal stability, oxidation, and tribological properties. *Surface and Coatings Technology*, *257*, 70-77. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.07.053

Purandare, Y., Ehiasarian, A., Santana, A., & Hovsepian, P. (2014). ZrN coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering and cathodic arc techniques. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, *32*(3). https://doi.org/10.1116/1.4869975

Ramadoss, R., Kumar, N., Pandian, R., Dash, S., Ravindran, T. R., Arivuoli, D., & Tyagi, A. K. (2013). Tribological properties and deformation mechanism of TiAlN coating sliding with various counterbodies. *Tribology International*, *66*, 143-149. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.05.001

RU, Q., HU, S., HUANG, N., ZHAO, L., QIU, X., & HU, X. (2008). Properties of TiAlCrN coatings prepared by vacuum cathodic arc ion plating. *Rare Metals*, *27*(3), 251-256. https://doi.org/10.1016/S1001-0521(08)60124-2

Sabzi, M., Mousavi Anijdan, S., Shamsodin, M., Farzam, M., Hojjati-Najafabadi, A., Feng, P., Park, N., & Lee, U. (2023). A Review on Sustainable Manufacturing of Ceramic-Based Thin Films by Chemical Vapor Deposition (CVD): Reactions Kinetics and the Deposition Mechanisms. *Coatings*, *13*(1), 188. https://doi.org/10.3390/coatings13010188

Schramm, B. C., Scheerer, H., Hoche, H., Broszeit, E., Abele, E., & Berger, C. (2004). Tribological properties and dry machining characteristics of PVD-coated carbide

inserts. *Surface and Coatings Technology*, *188-189*, 623-629. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.067

Sert, Y. (2022). *Sıcak dövme kalıpları için yüzey kaplama tabakası geliştirilmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.

Sert, Y., Ghahramanzadeh Asl, H., & Küçükömeroğlu, T. (2022). Tribological properties of in-situ PVD TiAlN, TiSiN, and TiAlN/TiSiN coatings under ambient air and vacuum environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, *236*(9), 1777-1792. https://doi.org/10.1177/14644207221083237

Sert, Y., Yeşilyurt, M., Günaydin, O., & Emir, L. T. (2021). Wear mechanisms in forging dies. Içinde *El-Cezeri Journal of Science and Engineering* (C. 8, Sayı 1, ss. 202-219). TUBITAK. https://doi.org/10.31202/ecjse.819457

She-quan, W., Kang-hua, C., Li, C., Chang-jun, Z., Ping, L., & Yong, D. (2011). Effect of Al and Si additions on microstructure and mechanical properties of TiN coatings. *J. Cent. South Univ. Technol*, *18*, 310-313. https://doi.org/10.1007/s11771−011−0696−4

Smolik, J., Walkowicz, J., & Tacikowski, J. (2000). Influence of the structure of the composite: 'nitrided layer/PVD coating' on the durability of tools for hot working. *Surface and Coatings Technology*, *125*(1-3), 134-140. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00593-9

Sönmezoğlu, S., Koç, M., & Akin, S. (2012). *İnce film üretim teknikleri* (C. 28, Sayı 5).

Spain, E., Avelar-Batista, J. C., Letch, M., Housden, J., & Lerga, B. (2005). Characterisation and applications of Cr–Al–N coatings. *Surface and Coatings Technology*, *200*(5-6), 1507-1513. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.086

Tabakov, V. P., Vereschaka, A. S., & Vereschaka, A. A. (2017). Multilayer composition coatings for cutting tools: formation and performance properties. *Mechanics & Industry*, *18*(7), 706. https://doi.org/10.1051/meca/2017063

Takikawa, H., & Tanoue, H. (2007). Review of cathodic arc deposition for preparing droplet-free thin films. *IEEE Transactions on Plasma Science*, *35*(4 II), 992-999. https://doi.org/10.1109/TPS.2007.897907

Terčelj, M., Panjan, P., Urankar, I., Fajfar, P., & Turk, R. (2006). A newly designed laboratory hot forging test for evaluation of coated tool wear resistance. *Surface and Coatings Technology*, *200*(11), 3594-3604. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.163

Türküz, M. C. (2006). *Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan zirkonyum nitrür ince film kaplamanın kaplama parametrelerinin incelenmesi ve optimizasyonu* İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.

Tkadletz, M., Mitterer, C., Sartory, B., Letofsky-Papst, I., Czettl, C., & Michotte, C. (2014). The effect of droplets in arc evaporated TiAlTaN hard coatings on the wear behavior. *Surface and Coatings Technology*, *257*, 95-101. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.01.010

Upadhyay, R. K., & Kumaraswamidhas, L. A. (2014). Surface modification by multilayered W/W 2 N coating. *Surface Engineering*, *30*(7), 475-482. https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000260

Vorobyova, M., Biffoli, F., Giurlani, W., Martinuzzi, S. M., Linser, M., Caneschi, A., & Innocenti, M. (2023). PVD for Decorative Applications: A Review. *Materials*, *16*(14), 4919. https://doi.org/10.3390/ma16144919

Warcholinski, B., Gilewicz, A., Myslinski, P., Dobruchowska, E., & Murzynski, D. (2020). Structure and properties of AlCrN coatings deposited using cathodic arc evaporation. *Coatings*, *10*(8). https://doi.org/10.3390/COATINGS10080793

Widomski, P., & Gronostajski, Z. (2020). Comprehensive Review of Methods for Increasing the Durability of Hot Forging Tools. *Procedia Manufacturing*, *47*, 349-355. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.280

Widomski, P., Kaszuba, M., Dobras, D., & Zindulka, O. (2021). Development of a method of increasing the wear resistance of forging dies in the aspect of tool material, thermo-chemical treatment and PVD coatings applied in a selected hot forging process. *Wear*, *477*, 203828. https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203828

Willmann, H., Mayrhofer, P. H., Persson, P. O. Å., Reiter, A. E., Hultman, L., & Mitterer, C. (2006). Thermal stability of Al–Cr–N hard coatings. *Scripta Materialia*, *54*(11), 1847-1851. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.02.023

Xie, Y., Si, S., Ju, Y., Luo, R., Zhou, L., & Cheng, X. (2023). Carbide evolution for a quenched and tempered Dievar steel. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, *39*(7), 815-827. https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2142746

Yalçin, E. D., Güler, O., Karabacak, A. H., Çanakçi, A., Varol, T., Kocaman, M., Çelebi, M., & Akçay, S. B. (2024). Pre-hardening water quenching effect on the wear resistance of TiCN coated 4140 steels. *Surface and Coatings Technology*, *480*. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130591

Yeşilyurt, M. (2021). *Darbeli yüklemenin TiN esaslı kaplamaların aşınma davranışına etkisi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Yilkiran, T., Behrens, B.-A., Paschke, H., Weber, M., & Brand, H. (2012). The potential of plasma deposition techniques in the application field of forging processes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *12*(3), 284-291. https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.06.002

Zhai, W., Bai, L., Zhou, R., Fan, X., Kang, G., Liu, Y., & Zhou, K. (2021a). Recent Progress on Wear-Resistant Materials: Designs, Properties, and Applications. Içinde *Advanced Science* (C. 8, Sayı 11). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/advs.202003739

Zhai, W., Bai, L., Zhou, R., Fan, X., Kang, G., Liu, Y., & Zhou, K. (2021b). Recent Progress on Wear-Resistant Materials: Designs, Properties, and Applications. Içinde *Advanced Science* (C. 8, Sayı 11). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/advs.202003739

Zhang, Z., Zhang, L., Yuan, H., Qiu, M., Zhang, X., Liao, B., Zhang, F., & Ouyang, X. (2022). Tribological Behaviors of Super-Hard TiAlN Coatings Deposited by Filtered Cathode Vacuum Arc Deposition. *Materials*, *15*(6), 2236. https://doi.org/10.3390/ma15062236

Zhecheva, A., Malinov, S., & Sha, W. (2006). Titanium alloys after surface gas nitriding. *Surface and Coatings Technology*, *201*(6), 2467-2474. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.019

Zhu, J. Q., Johansson-Jöesaar, M. P., Polcik, P., Jensen, J., Greczynski, G., Hultman, L., & Odén, M. (2013). Influence of Ti-Si cathode grain size on the cathodic arc process and resulting Ti-Si-N coatings. *Surface and Coatings Technology*, *235*, 637-647. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.08.042

Zuo, S., Miao, Q., Liang, W., Xiao, F., Ding, Z., Cheng, J., Xue, L., & Xu, X. (2021). Effect of plasma carbonitriding on the high-temperature tribological properties of a TiAlCrN coating on 300M steel by multi-arc ion plating. *Philosophical Magazine*, *101*(10), 1188-1201. https://doi.org/10.1080/14786435.2021.1887530

ÖZGEÇMİŞ

Mohammad Javad AZIMI IGDIR, lk, orta ve lise öğrenimini Şiraz'da tamamladı. 2006–2007 öğretim döneminde Marvdaşt Azad Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 2010 yılında bu bölümden "Makine Mühendisi" unvanı ile mezun oldu. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve 2016 yılında mezun oldu. 2019 yılında aynı anabilim dalında doktora eğitimine başlamış olup, tez çalışmasını 2025 yılında tamamlamıştır. Doktora eğitimi süresince 3 BAP projesinde ve bir TÜBİTAK projesinde araştırmacı olarak görev almıştır.