

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DARBELİ YÜKLEMENİN TİN ESASLI KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa YEŞİLYURT

**TEMMUZ 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DARBELİ YÜKLEMENİN TİN ESASLI KAPLAMALARIN
AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Mustafa YEŞİLYURT

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 / 06 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 05 / 07 / 2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Mühendislikte bir tribolojik sistemi temsil eden mekanik sistem bileşenlerinin verimliliğini, performansını, güvenilirliğini ve ömrünü etkileyen sürtünme ve aşınma gibi tribolojik etmenler, enerji ve hammadde kaynaklarının verimli kullanılmasını etkilemekle birlikte endüstriyel uygulamalarda üretim kalitesi ve maliyet giderleri bakımından önem teşkil etmektedir. Bu doğrultuda, endüstride makine elemanlarının sürtünme ve aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla fonksiyon yüzeylerine birtakım yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemler arasında makine elemanlarının yüzeylerinin ince sert kaplama tabakaları ile kaplanması en etkili yöntemlerdendir. Özellikle son zamanlarda ince sert kaplama yöntemlerinden Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) tekniklerinde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Bu yöntemle uygulanan TiN esaslı kaplama tabakaları aşınmanın baskın faktör olduğu birçok endüstriyel uygulamada başarıyla kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda darbeli yüklerin etkili olduğu plastik şekil verme uygulamalarında kullanılan makine elemanlarının tribolojik özelliklerinin TiN esaslı ince sert kaplama uygulamalarıyla iyileştirilmesi düşüncesi doğrultusunda, darbeli yüklemenin etkili olduğu üretim yöntemlerinin çalışma koşullarını temsil eden deneysel laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada darbeli yüklere maruz dövme kalıplarının fonksiyon yüzeylerine TiN esaslı kaplama tabakalarının PVD yöntemiyle uygulanarak aşınma dayanımlarının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu sayede darbeli yüklerin etkili olduğu endüstriyel alanda üretim süreçlerinin iyileştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi ve EGEMET Ege Metal Dövme San. ve Tic. Ltd. Şti. işbirliği kapsamında yürütülen 5190089 TÜBİTAK 1505 Üniversite-Sanayi İş Birliği ve FSI-2019-8473 BAP projeleri bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında, TÜBİTAK’a, Karadeniz Teknik Üniversitesi’ne, EGEMET’e, her türlü desteğini, ilgisini ve tecrübelerinin katkısını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU’na ve ayrıca bilimsel/teknik destekleri için Sayın Arş. Gör. Yaşar SERT’e katkılarından dolayı en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım. Tüm eğitim-öğretim hayatım boyunca her türlü desteklerinden dolayı değerli arkadaşlarıma ve aileme teşekkür ederim.

Mustafa YEŞİLYURT

Trabzon, 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “DARBELİ YÜKLEMENİN TiN ESASLI KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Tefvik KÜÇÜKÖMEROĞLU’nun 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 sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/07/2021

Mustafa YEŞİLYURT

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER VE TRİBOLOJİ BİLİMİ.....	3
2.1. Triboloji Biliminin Genel Sınıfları.....	7
2.1.1. Sürtünme.....	9
2.1.2. Aşınma	10
2.1.2.1. Aşınma Mekanizmaları.....	12
2.1.2.1.1. Adezif Aşınma.....	12
2.1.2.1.2. Abrazif Aşınma.....	13
2.1.2.1.3. Yorulma Aşınması.....	14
2.1.2.1.4. Korozi Aşınma	14
2.1.2.1.5. Erozi Aşınma.....	15
2.1.2.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler	16
2.1.3. Yağlama	18
2.1.4. Yüzey İşlemleri	18
3. YÜZEY KAPLAMA TEKNİĞİ	20
3.1. Tribolojik Amaçlı Kaplamalar	21
3.1.1. Tribolojik Amaçlı Nanoyapılı Sert Kaplamalar	22

3.1.2.	Tribolojik Amaçlı Yüzey Kaplama Yöntemleri	23
3.1.2.1.	Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi	25
3.1.2.2.	Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi	27
3.1.2.2.1.	Buharlaştırma Yöntemi.....	30
3.1.2.2.2.	Sıçratma Yöntemi	31
3.1.2.2.2.1.	Manyetik Alanda Sıçratma Tekniği.....	33
3.1.2.2.2.1.1.	Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma Tekniği.....	34
3.1.2.2.2.1.1.1.	Dengesiz Kapalı-Alan Manyetik Alanda Sıçratma Tekniği	35
3.1.2.2.2.2.	PVD Yöntemiyle Sıçratma Tekniği Sürecinin Aşamaları	37
3.1.2.2.2.3.	Sıçratma Yöntemindeki Kaplama Hedef Malzemeleri.....	38
3.2.	Sert Kaplamalar	38
3.3.	Sert Kaplama Yapıları ve Çeşitleri.....	39
3.3.1.	Ti, Al ve Zr Katkılı Sert Kaplamalar	40
3.3.1.1.	TiN Kaplama	41
3.3.1.2.	AlN Kaplama	41
3.3.1.3.	ZrN Kaplama	42
3.3.1.4.	TiAlN Kaplama	42
3.3.1.5.	AlTiN Kaplama	42
3.3.1.6.	TiZrN Kaplama.....	43
3.3.1.7.	TiAlZrN Kaplama	43
4.	UYGULAMALARDA DARBELİ YÜK ETKİSİ	44
4.1.	Darbeli Yük Etkisi İle Üretim Uygulaması	44
4.1.1.	Dövme Üretim Yöntemi	45
4.1.1.1.	Dövme Kalıplarında Oluşan Genel Hasarlar	46
4.1.1.2.	Dövme Kalıplarında Oluşan Hasarların Önlenmesi	50
5.	AŞINMANIN ÖLÇÜLMESİ VE SİSTEMATİK İNCELENMESİ.....	54
5.1.	Aşınma Testi Uygulaması.....	56
5.1.1.	Darbe Etkili Aşınma Testi	58
5.1.1.1.	Darbeli-Kayma Aşınma Etkisinin İncelenmesi	60
6.	ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI.....	64

7.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	65
7.1.	Deney Numunelerinin Hazırlanması	66
7.2.	Numunelerin Nitrürleme İşlemi	67
7.3.	Kaplama İşleminde Uygulanan Yöntem.....	68
7.4.	Kaplama İşleminde Deneysel Tasarım	69
7.5.	Kaplama İşlemi Uygulaması	71
7.6.	Mikrosertlik Testleri	74
7.7.	Nanosertlik Testleri	75
7.8.	Yapısal İncelemeler	75
7.9.	Adezyon (Çizik) Testi Deneyleri.....	75
7.10.	Aşınma Testleri	77
8.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	81
8.1.	Kaplama Yüzey Morfolojilerinin ve Kesitlerinin İncelenmesi	82
8.1.1.	Değişken Kaplama Parametrelerinin Kaplama Kalınlıklarına Etkisi	89
8.2.	EDS Analizi Sonuçları	91
8.3.	XRD Analizi Sonuçları.....	93
8.4.	Mikrosertlik ve Nanosertlik Analiz Sonuçları.....	98
8.4.1.	Değişken Kaplama Parametrelerinin Mikrosertlik Değerlerine Etkisi.....	99
8.4.2.	Değişken Kaplama Parametrelerinin Nanosertlik Değerlerine Etkisi	102
8.5.	Adezyon (Çizik) Testi Analizleri	104
8.5.1.	Kaplama Parametrelerinin Adezyon Dayanımlarına Etkisi.....	104
8.5.2.	Çizik Testlerinin SEM Görüntüleri	107
8.6.	Aşınma Deneyi Sonuçları.....	113
8.6.1.	Profilometre Analizleri	114
8.6.2.	Değişken Kaplama Parametrelerinin Aşınma Dayanımına Etkisi.....	129
8.6.3.	Aşınma İzlerinin SEM Analizleri	135
9.	SONUÇLAR.....	142
10.	ÖNERİLER	143
11.	KAYNAKLAR.....	144

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

**DARBELİ YÜKLEMENİN TİN ESASLI KAPLAMALARIN
AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

Mustafa YEŞİLYURT

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU

2021, 156 Sayfa

Bu çalışma esas olarak darbeli yüklerin malzeme yüzeylerine tribolojik amaçlarla uygulanan TiN (Titanyum-Nitrür) esaslı sert ince kaplamaların aşınma davranışına etkilerini incelemektedir. Bu sayede TiN esaslı kaplamalarla endüstride darbeli yüklere maruz makine elemanlarının aşınma dayanımlarının geliştirilmesi ve böylece ilgili endüstriyel kuruluşların karşılaştığı aşınma kaynaklı olumsuzlukların giderilerek üretim süreçlerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda öncelikli olarak triboloji biliminin temel ilkeleri üzerinde durulmaktadır. Bu bilgiler ışığında darbeli yüklerin etkili olduğu endüstriyel uygulamalardaki makine elemanlarının aşınma davranışları ve bu etki altında meydana gelen aşınma mekanizmaları incelenmektedir. Çalışmanın amacına yönelik olarak yüksek güç yoğunluklu kapalı dengersiz manyetik alanda PVD sıçratma tekniği kullanılarak yüzeyleri TiAlZrN kaplanan 9 farklı DIN 1.2344 çelik numunenin yapısal incelemeleri ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. Numunelerin kaplama işleminde ‘bias gerilimi’, ‘zirkonyum hedef malzeme akımı’ ve ‘çalışma basıncı’ değişken kaplama parametreleri olarak belirlenmiştir. Değişken kaplama parametrelerinin kaplamaların karakteristik özelliklerine ve dolayısıyla aşınma dayanımına etkisi ANOVA analiz yöntemi ile tespit edilmiştir. Aşınma deneyleri darbeli yüklerin etkili olduğu çalışma koşullarını temsil eden darbeli-kayma aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yapısal özellikleri mikrosertlik, nanosertlik, adezyon dayanımı, tane boyutu, kaplama kalınlıkları, XRD ve EDS analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapısal incelemeler, aşınma deneylerinden elde edilen bulgular ve SEM görüntülerinde gözlemlenen aşınma mekanizmaları değerlendirilerek numunelerin darbeli-kayma aşınma dayanımını iyileştirecek değişken parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sert Kaplama, PVD, TiAlZrN, Aşınma, Darbeli-Kayma Aşınma Testi

Master Thesis

SUMMARY

EFFECT OF IMPACT LOADING ON WEAR BEHAVIOR OF TiN-BASED COATINGS

Mustafa YEŞİLYURT

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU
2021, 156 Pages

This study mainly examines the effects of impact-sliding loading on the wear behavior of TiN-based (Titanium-Nitride) hard thin coatings applied to material surfaces for tribological purposes. By means of TiN-based coatings, it is aimed to improve the wear resistance of mechanical parts that expose to impact loads and thus to improve the production process by eliminating the wear-related problems in the relevant industry. Therefore, the research of the basic principles of tribology science is initially included. Thereafter, the wear behavior of mechanical parts under the influence of impact loads in the industrial applications and the wear mechanisms that occur under this effect are examined in accordance with the literature. For the purpose of the study, structural investigations and experimental studies of the coatings were carried out on 9 different DIN 1.2344 steel specimens coated with TiAlZrN deposited using high-power impulse closed unbalanced magnetron sputtering PVD technique. ‘Bias voltage’, ‘zirconium target current’ and ‘working pressure’ were determined as variable parameters in the deposition process of the specimens. The effect of variable parameters on the microstructural characteristic features of the coatings and therefore on the wear resistance was determined by ANOVA analysis method. New design innovative tribology tester which represents forging conditions is used for impact-sliding wear tests of forging die specimens. The structural properties of the specimens were evaluated by microhardness, nanohardness, adhesion strength, grain size, coating thickness, XRD and EDS analysis. By evaluating the findings, the wear test results and mechanisms observed on SEM images of the wear scars, it is aimed to determine the variable parameters that improve impact-sliding wear resistance of the specimens.

Keywords: Hard Coating, PVD, TiAlZrN, Wear, Impact-Sliding Wear Test

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Tribolojik sistemin yapısı ve bileşenlerinin şematik gösterimi.	5
Şekil 2. Tribolojik sisteme etki eden etmenler.	6
Şekil 3. Tribolojik sistemlerde etkileşim ve tribolojik sistem enerjisi.	6
Şekil 4. Tribolojide temel yüzey hasar tipleri.	7
Şekil 5. Triboloji biliminin sınıflandırılması.....	7
Şekil 6. Sürtünme mekanizmasının şematik gösterimi.....	9
Şekil 7. (a) Kayma sürtünmesi, (b) Yuvarlanma sürtünmesi.	9
Şekil 8. Aşınmanın anahtar kelimeleri ve temas tiplerinin tanımlamaları.	11
Şekil 9. Genel aşınma mekanizmaları.	12
Şekil 10. Adezif aşınma mekanizması.....	12
Şekil 11. Abrazif aşınma mekanizmaları; (a) sert yüzey pürüzlerinin daha yumuşak yüzeyi aşındırması, (b) yüzeyler arasındaki sert partiküllerin yüzeyleri aşındırması mekanizması.....	13
Şekil 12. Yorulma aşınması mekanizması.....	14
Şekil 13. Koroziif aşınmanın meydana geldiği yüzey görünümü.	15
Şekil 14. Erozif aşınma mekanizması ve erozif aşınma meydana gelen yüzey görünümü	16
Şekil 15. Aşınmaya etki eden faktörler.	16
Şekil 16. Yüzey işlemlerinin genel sınıflandırılması.	19
Şekil 17. Yüzey kaplama tekniklerinin genel sınıflandırılması.....	21
Şekil 18. TiN ve TiCN kaplanmış malzemelerin yapısal görünümü.....	22
Şekil 19. Tribolojik amaçlı yüzey kaplama tekniklerinin kullanılan kaplama malzemesinin fiziksel durumuna göre sınıflandırılması.....	24

Şekil 20. CVD yönteminin genel olarak uygulama prensibinin gösterimi.....	26
Şekil 21. CVD kaplama sürecinin genel akış şeması.	26
Şekil 22. CVD kaplama yöntemlerinin genel sınıfları.	27
Şekil 23. PVD kaplama yöntemleri.	29
Şekil 24. Sıçratma tekniğinin şematik gösterimi; a) Bombardıman, b) Kopartma.....	31
Şekil 25. Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi.	34
Şekil 26. Dengesiz manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi.	34
Şekil 27. Kapalı-alan dengesiz çift manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi.....	35
Şekil28. Kapalı-alan dengesiz dörtlü manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi.	36
Şekil 29. PVD sıçratma yöntemi ile kaplama işleminin akış şeması.....	37
Şekil 30. Sert kaplama tabakası yapıları.....	39
Şekil 31. Plastik şekil verme yöntemlerinin genel sınıflandırılması.	45
Şekil 32. Dövme işleminin sınıflandırılması.	45
Şekil 33. Dövme işleminin şematik gösterimi.....	46
Şekil 34. Dövme kalıplarında meydana gelen başlıca hasar tipleri.....	48
Şekil 35. Dövme kalıplarında karşılaşılan hasar türleri ve sıklıkları.....	49
Şekil 36. Dövme kalıplarında meydana gelen aşınma türleri ve oranları.....	49
Şekil 37. Dövme kalıplarında meydana gelen termo-mekanik çatlak ağı.	50
Şekil 38. Termo-mekanik çatlak ağı detayı.	51
Şekil 39. Darbeli yüklere maruz elemanların dayanıklılığını iyileştirme yöntemleri.	52
Şekil 40. En çok kullanılan sürtünme-aşınma deney düzeneklerinin bir arada şematik olarak gösterimi.....	55
Şekil 41. Bilye-disk döner aşınma test düzeneğinin şematik gösterimi	56
Şekil 42. Geleneksel bilye-disk (pim-disk) aşınma test düzeneği	57
Şekil 43. Darbeli-kayma test uygulamasının şematik olarak gösterimi.	58

Şekil 44. Deneysel çalışmaların uygulandığı darbeli-kayma aşınma test düzeneği ve çalışma prensibi	59
Şekil 45. Darbeli-kayma aşınma izinin gösterimi.	60
Şekil 46. Darbeli-kayma aşınma testinin şematik görünümü.	61
Şekil 47. Darbeli-kayma aşınma testinin ve oluşan temel hasarların şematik görünümü . 61	
Şekil 48. Darbeli-kayma aşınma izinde oluşan aşınma hasar mekanizmaları.	62
Şekil 49. Deneysel çalışma sürecinin akış şeması	65
Şekil 50. PVD kaplama işleminin gerçekleştirildiği ekipman.....	72
Şekil 51. Numunelerin mikrosertlik ölçümü	74
Şekil 52. Adezyon (çizik) deneyi uygulamasının şematik görünümü	76
Şekil 53. Darbeli-kayma aşınma testlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği.....	77
Şekil 54. Numunelerin darbeli-kayma aşınma izi	79
Şekil 55. Elde edilen kaplamaların ölçülen ortalama kalınlık değerleri.....	83
Şekil 56. R1 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü ...	83
Şekil 57. R2 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü ...	84
Şekil 58. R3 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü ...	84
Şekil 59. R4 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü ...	85
Şekil 60. R5 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü ...	85
Şekil 61. R6 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü ...	86
Şekil 62. R7 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü ...	86
Şekil 63. R8 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü ...	87
Şekil 64. R9 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü ...	87
Şekil 65. Değişken kaplama parametrelerinin kaplama kalınlığına etkisi.....	89
Şekil 66. Numunelerin XRD piklerinin görünümü	94
Şekil 67. Numunelerin mikrosertlik değerleri grafiği	98
Şekil 68. Numunelerin nanosertlik değerleri grafiği	98

Şekil 69. Değişken kaplama parametrelerinin mikrosertlik değerlerine etkisi.....	99
Şekil 70. Değişken kaplama parametrelerinin nanosertlik değerlerine etkisi	102
Şekil 71. Değişken kaplama parametrelerinin adezyon dayanımlarına etkisi	105
Şekil 72. R1 numunesinin scratch izi görünümü.....	108
Şekil 73. R2 numunesinin scratch izi görünümü.....	108
Şekil 74. R3 numunesinin scratch izi görünümü.....	109
Şekil 75. R4 numunesinin scratch izi görünümü.....	109
Şekil 76. R5 numunesinin scratch izi görünümü.....	110
Şekil 77. R6 numunesinin scratch izi görünümü.....	110
Şekil 78. R7 numunesinin scratch izi görünümü.....	111
Şekil 79. R8 numunesinin scratch izi görünümü.....	111
Şekil 80. R9 numunesinin scratch izi görünümü.....	112
Şekil 81. R1 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri.....	114
Şekil 82. R2 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri.....	114
Şekil 83. R3 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri	115
Şekil 84. R4 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri.....	115
Şekil 85. R5 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri	116
Şekil 86. R6 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri.....	116
Şekil 87. R7 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri.....	117
Şekil 88. R8 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri.....	117
Şekil 89. R9 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri.....	118

Şekil 90.	Taban malzemenin (işlemsiz numune) profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri.....	118
Şekil 91.	R1 - R2 - R3 numunelerinin karşılaştırmalı aşınma izi profilleri; a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi	119
Şekil 92.	R4 - R5 - R6 numunelerinin karşılaştırmalı aşınma izi profilleri; a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi	120
Şekil 93.	R7 - R8 - R9 numunelerinin karşılaştırmalı aşınma izi profilleri; a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi	121
Şekil 94.	Numunelerin aşınma izleri boyunca aşınma izi profili grafikleri	122
Şekil 95.	Numunelerin aşınma izlerinden elde edilen aşınma miktarı değerleri grafiği..	128
Şekil 96.	Değişken kaplama parametrelerinin aşınma dayanımına etkisi.....	129
Şekil 97.	R3 - R6 - R9 numunelerinin kaplama özelliklerinin değişim grafikleri.....	130
Şekil 98.	Numunelerin darbeli-kayma aşınma izi SEM görüntüleri	136

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.	DIN 1.2344 takım çeliğinin özellikleri	66
Tablo 2.	TiAlZrN kaplama tabakasının PVD uygulama parametreleri.....	73
Tablo 3.	Darbeli-kayma aşınma deneyinin uygulama parametreleri.....	78
Tablo 4.	Kaplama tabakalarının tane boyutu değerleri.....	82
Tablo 5.	Kaplama kalınlığına etki eden değişken kaplama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği	90
Tablo 6.	Değişken kaplama parametrelerinin kaplama kalınlıklarına ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları	90
Tablo 7.	TiAlZrN kaplama tabakasının EDS analiz sonuçları.....	92
Tablo 8.	Mikrosertlik değerlerine etki eden değişken kaplama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği.....	100
Tablo 9.	Değişken kaplama parametrelerinin mikrosertlik değerlerine ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları	100
Tablo 10.	Nanosertlik değerlerine etki eden değişken kaplama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği	103
Tablo 11.	Değişken kaplama parametrelerinin nanosertlik değerlerine ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları.....	103
Tablo 12.	Kaplamaların (Lc_2) adezyon dayanımları.....	104
Tablo 13.	Adezyon dayanımına etki eden değişken kaplama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği.....	105
Tablo 14.	Değişken kaplama parametrelerinin adezyon dayanımlarına ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları	106
Tablo 15.	Numunelerin aşınma izi profillerinden elde edilen aşınma miktarı değerleri ...	127
Tablo 16.	Aşınma dayanımına etki eden değişken kaplama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği	131
Tablo 17.	Değişken kaplama parametrelerinin aşınma dayanımlarına ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları	131
Tablo 18.	Deneyisel çalışmaların genel sonuçları ile numunelerin kaplama parametreleri.....	135

SEMBOLLER DİZİNİ

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Al	: Alüminyum
AlN	: Alüminyum Nitrür
AlTiN	: Alüminyum Titanyum Nitrür
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
ANOVA	: Varyans Analizi
Ar	: Argon
ASLE	: Amerikan Yağlama Mühendisleri Derneği
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
Cr	: Krom
CuK _α	: Bakır Radyasyonu
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
D	: Çap
DC	: Doğru Akım
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometrisi
EN	: Avrupa Normu
F	: Kuvvet (Newton)
F _N	: Doğrusal Kuvvet (Newton)
Fe	: Demir
H	: Hidrojen
h	: Yükseklik

h-AlN	: Hegzagonal Alüminyum Nitrür
HRC	: Rockwell Sertliği
HV	: Vickers Sertliği
h-ZrN	: Hegzagonal Zirkonyum Nitrür
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Mıknatısın Kuzey Ucu
N ₂	: Azot
P	: Fosfor
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
S	: Mıknatısın Güney Ucu
S	: Kükürt
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
S/N	: Sinyal/Gürültü Oranı
Ti	: Titanyum
TiN	: Titanyum Nitrür
TiAlN	: Titanyum Alüminyum Nitrür
TiCN	: Titanyum Karbon Nitrür
TiZrN	: Titanyum Zirkonyum Nitrür
TiAlZrN	: Titanyum Alüminyum Zirkonyum Nitrür
V	: Vanadyum
V	: Çizgisel Hız (metre/saniye)

VSD	: Vickers Sertlik Deneyi
W	: Açısal Hız (radyan/saniye)
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik Yapı
Zr	: Zirkonyum
ZrN	: Zirkonyum Nitrür
A	: Akım Birimi, Amper
Å	: Dalga Boyu Ångström Birimi
°C	: Santigrat Derece
dak.	: Dakika
gr	: Gram
hertz	: Frekans Birimi
kHz	: Kiloherertz
kg	: Kilogram
Lc	: Kritik Yük
mm	: Milimetre
N	: Kuvvet Birimi (Newton)
nm	: Nanometre
torr	: Basınç Birimi (Milimetre-Civa, mmHg)
µm	: Mikrometre
µs	: Mikrosaniye
V	: Volt, Gerilim
λ	: Lamda
Θ	: Teta, Derece

1. GİRİŞ

Enerji, mühendislik disiplinlerinin vazgeçilmez bir olgusu olarak birçok mühendislik prensibinin temelini temsil etmektedir. İnsanlık var olduğundan bu yana bir gereksinim olan enerji insanlık tarihini ve dolayısıyla teknolojiyi şekillendiren en önemli etkenlerden biri olmuştur. Bu doğrultuda enerjiyi anlamak ve insanlık için kullanmak tarih boyunca önemini korumuştur. Dünya üzerindeki enerji ve hammadde kaynaklarının sınırlı oluşu ya da artan dünya nüfusu ve gelişen teknoloji ile birlikte kaynakların hızla tüketilmesi; insanları enerji ve hammadde kaynaklarını daha verimli kullanmanın yöntemlerini araştırmaya ve geliştirmeye yönlendirmiştir. Bu amaçla hammadde ve enerjinin daha efektif kullanım yöntemleri üzerine yapılan mühendislik çalışmaları önem kazanmıştır. Mühendislik alanında gerçekleştirilen gelişmeler tarih boyunca sürekli gelişim göstererek şekillenmiş ve birçok farklı alana ayrılmıştır. Bu kapsamda mühendislik gelişmelerinin bir alanı olarak triboloji bilimi enerji ve hammadde kaynaklarının verimli kullanılması konusunda önem teşkil etmektedir.

Triboloji biliminde sağlanan gelişmeler diğer birçok mühendislik alanını doğrudan etkilemekle birlikte endüstriyel uygulamalardaki verimlilik, performans, kalite ve maliyet gibi kriterlerin belirleyici temel etkenlerinden birini oluşturmaktadır. Bu kriterlerin sağlanması amacıyla sürtünme ve aşınmanın etkili olduğu makine elemanları yüzeylerinin belirli tribolojik özellikleri sağlaması istenmektedir. Malzeme yüzeylerinin belirli tribolojik özellikleri sağlaması triboloji bilimi kapsamındaki çalışmalarla gerçekleştirilmektedir. Bu anlamda malzeme yüzeylerinin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik bazı özel yüzey işlemlerine veya kaplama tekniklerine gereksinim duyulmaktadır. Malzeme yüzeylerinin çeşitli yüzey işlemleri ve kaplama teknikleri ile tribolojik özelliklerinin geliştirilerek yüzey kalitelerinin artırılması, makine elemanlarının kullanım ömürlerini, mevcut çalışma şartlarındaki performanslarını ve verimliliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği bilinmektedir. Aynı zamanda bütün bu geliştirmeler sayesinde endüstriyel kuruluşların sürtünme ve aşınmadan kaynaklanan maliyet giderlerini düşürebilme olanağı sağlanabilmektedir. Malzeme yüzeylerinin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesinde, sert ince kaplama tabakalarıyla gerçekleştirilen yüzey kaplama yöntemlerinin uygulamalarda oldukça etkili yüzey işlemleri olduğu bilimsel çalışmalarda kanıtlanmıştır. Yüzey kaplama teknikleri son zamanlarda sağladığı teknolojik gelişmeler sayesinde birçok uygulama

alanında yerini almıştır. Özellikler son zamanlarda geliştirilen tribolojik amaçlı sert yüzey kaplama teknikleri endüstriyel uygulama alanlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Yüzey kaplama uygulamalarının ekonomik ve teknik avantajları yüzey kaplama yöntemlerini birçok bilimsel çalışmanın konusu haline getirmiştir. Endüstriyel uygulamalarda tribolojik amaçlı sert yüzey kaplama işlemlerinin geliştirilen özellikleri yanında daha farklı özellikleri sağlamanın gerçekleştirilmesi amacıyla, uygulanan mevcut kaplama yöntemleri ve kaplama tabakalarına yönelik araştırma-geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir. Gerçekleştirilecek araştırma-geliştirme çalışmalarından faydalı bulguların literatüre ve sanayiye kazandırılması, mevcut bilimsel bilgi birikiminin detaylarıyla incelenmesi sayesinde sağlanabilecektir. Geliştirilen yüzey kaplamalardan beklenen genel özellikler; yüksek sertlik, iş parçasına düşük yapışma özelliği, kaplanan dövme kalıp malzemesine yüksek yapışma karakteri, yüksek aşınma direnci, yüksek kimyasal kararlılık ve tokluk, yüksek yük taşıma kapasitesi, düşük kesme kuvvetleri, düşük ısıl yayınma katsayısı ve yüksek oksidasyon direnci olarak sıralanabilir. Literatürde konu hakkında verilen bilimsel bilgi birikiminden elde edilen bilgilere göre endüstriyel uygulamalarda makine elemanlarının hasara uğrayarak kullanılamaz hale gelmelerinin en önemli sebebinin aşınma olduğu dikkat çekmektedir. Bu bağlamda makine elemanlarının öncelikli olarak aşınma dayanımlarının artırılması yönünde uygulanacak kaplama tabakaları üzerinde yapılacak çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Öte yandan aşınma dayanımları sert kaplama uygulama yöntemleri sayesinde oldukça geliştirilen kaplama tabakalarının yüzeylere aşınma dayanımı dışında farklı tribolojik üstünlükler kazandırması da beklenmektedir. Bu özellikler arasında iş parçası ile kaplama elemanı arasında meydana gelen yapışmanın en aza indirilmesi, yüksek çalışma hızlarında ısıl iletkenliğin fazla olmasının ve yüksek sıcaklıklarda yüksek oksidasyon dayanımına sahip olması endüstriyel kuruluşlarının sert kaplamalardan sağlamanı talep ettiği özellikler olmaktadır. Bahsedilen bütün özelliklerin tek bir kaplama tabakası ile sağlanması oldukça zordur. Bu nedenle sert kaplama yöntemlerinin uygulanacağı endüstriyel uygulama alanının çalışma şartları dikkate alınarak kaplamanın sağlanması beklenen özelliklerinin belirlenmesi sonucunda alanına özel kaplama tabakası üzerine deneysel geliştirme çalışmaları sayesinde makul sonuçlar elde edilebilecektir. Bu hususlar dikkate alınarak bu çalışmada dövme kalıplarının uygulama şartlarını temsil edecek deneysel düzenekler kullanılarak PVD kaplama yönteminin kapalı dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniğiyle TiAlZrN kaplama tabakasıyla kaplanan dövme kalıp numunelerinin aşınma davranışları incelenmektedir.

2. GENEL BİLGİLER VE TRIBOLOJİ BİLİMİ

Triboloji, Yunancada sürtünme anlamına gelen '*tribos*' kelimesi ile bilim anlamına gelen '*logia*' kelimelerinin birleşiminden meydana gelmekle birlikte günümüzde birbiri üzerinde göreceli hareket yapan yüzeylerin aşınma, sürtünme, yağlama durumlarını ve bunların birbiriyle etkileşimlerini inceleyen bilim dalı olarak bilinmektedir [1]. Günümüzdeki modern anlamda triboloji biliminin tanımlanması 1966 yılında İngiliz bilim insanı Peter Jost tarafından ortaya konulmuştur. 1970 ve 1980'li yıllarda meydana gelen enerji krizinde enerji kaybını önlemek için yapılan çalışmalar özellikle sürtünme, aşınma ve yağlama konularını içeren triboloji biliminin önemini ortaya çıkarmıştır. Aşınma ve sürtünmenin neden olduğu kayıplar üzerine yapılan araştırmalarda, dünyada enerji tüketiminin yaklaşık % 20'si sürtünme, % 3'ü aşınma ve aşınmaya bağlı kayıplara harcanmaktadır. Dünya genelinde gerçekleştirilen araştırma çalışmalarından elde edilen bilgilere göre, makine elemanlarının yaklaşık olarak % 70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeninin aşınma kaynaklı olduğu belirtilmektedir. Ayrıca mekanik sistemlerde meydana gelen sürtünme sebebiyle sarf edilen enerji kayıpları ilave maliyetler doğurmaktadır. Aşınma dolayısıyla makinelerde ortaya çıkan hasar ve arızaların giderilmesi için harcanan zaman, işgücü ve sarf malzeme giderleri de göz önünde bulundurulduğunda triboloji biliminin önemi çok daha iyi anlaşılmaktadır [2].

Triboloji bilimi; kimya, fizik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, malzeme bilimi, yüzey bilimi ve makine mühendisliği gibi farklı disiplinler hakkında bilgiler gerektirmektedir. Tarihin en eski dönemlerinden beri önemini koruyan triboloji, özellikle 20'nci yüzyıldan sonra artan endüstriyel gelişmelerle birlikte makine elemanlarının ömür koşullarının daha dar sınırlara taşınmasından dolayı giderek önem kazanmıştır. Bu açıdan triboloji bilimi, uzay araçlarından günlük ev aletlerine kadar geniş bir uygulama alanında sistem bileşenlerinin verimliliği, çalışma kalitesi, güvenilirliği ve yıpranması gibi ekonomik öneme sahip problemleri kapsamaktadır [3, 4].

Triboloji biliminin içeriği ve kavramları bir tribolojik sistem tanımının ortaya konulması sayesinde ifade edilmektedir. Tribolojik sistem genel olarak; karşılıklı etkileşim halinde olan elemanlarda meydana gelen sürtünme ve aşınma olaylarını inceler. Temel olarak bir tribolojik sistemde belirli bir yük altında temas eden ve belirli bir kayma hızında karşıt harekete sahip yüzeyler bulunmaktadır. Sürtünmenin meydana geldiği durumda

tribolojik sistem; çevre, izafi hareket, kuvvet (yük), esas malzeme, karşı malzeme, ara madde (ara katman), sürtünme yüzeyleri ve ara malzeme gibi bileşenlerden meydana gelmektedir [5].

Çevre (Ortam): Sistemi kapsayan ve genelde sıvı ya da gaz halinde bulunan ortamdır. Sıvı ve gazlar teknik olarak en yaygın görülen çevre ortamlarıdır. Çevre şartları tribolojik sisteme ve sistem bileşenlerinin tribolojik etkileşimlerine etki etmektedir.

İzafi hareket: Esas sürtünen malzemenin karşı malzemeye göre izafi hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma ya da çarpma), büyüklüğü ve doğrultusuyla belirlenen hareket olarak ifade edilmektedir.

Kuvvet (Yük): Sisteme etkileyen kuvvetin çeşidi (statik, dinamik, darbeli veya titreşimli kuvvet), büyüklüğü, doğrultusu ve zamana bağlı değişimi; yüklemenin şiddetini belirleyen etmenleri meydana getirir.

Esas malzeme (Aşınan malzeme): Fiziksel ve kimyasal özelliklerine ilave olarak yüzeysel yapısı ve durumu belirlenerek aşınma durumu üzerinde inceleme yapılan malzemedir.

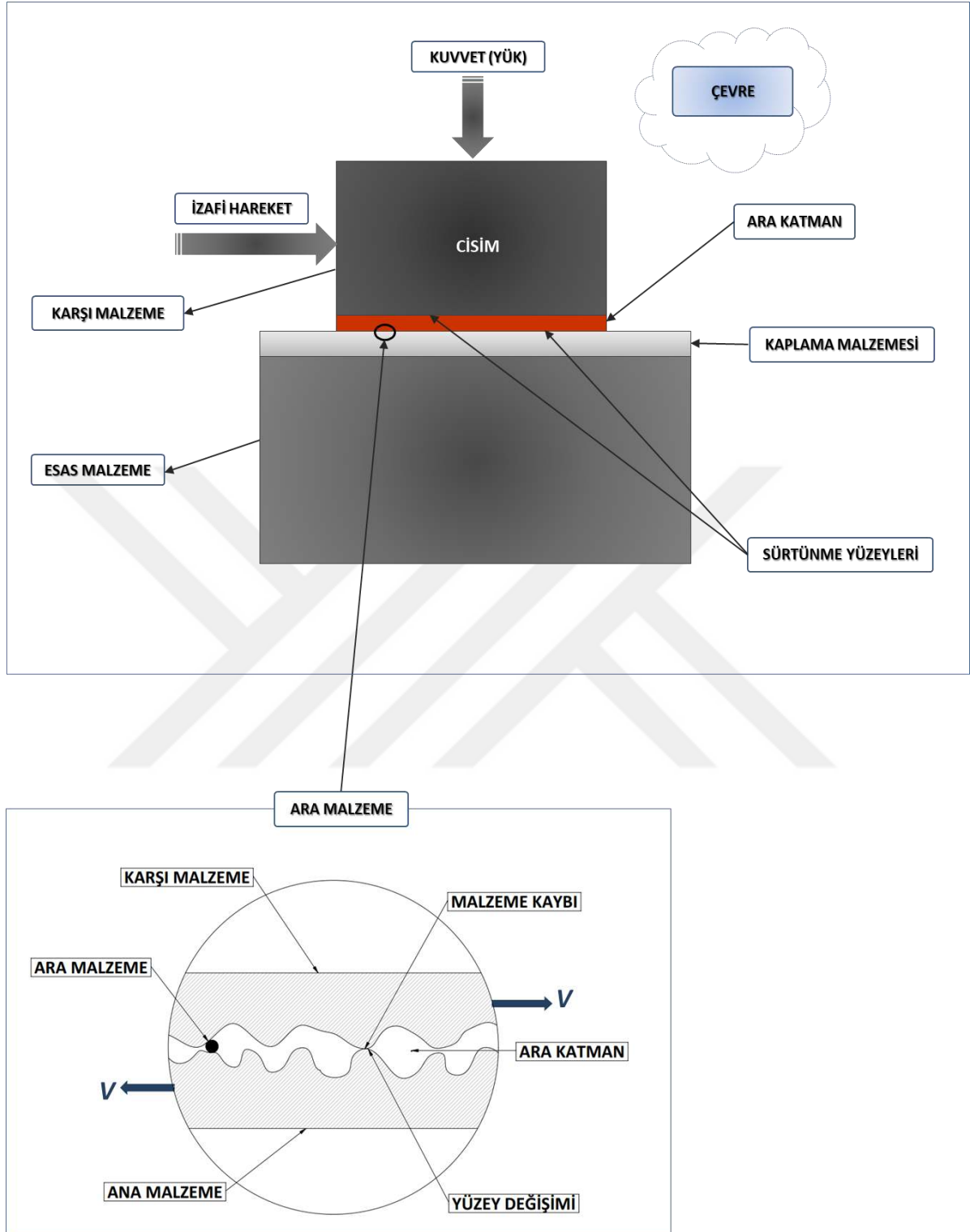
Karşı malzeme (Aşındıran malzeme): Esas malzeme ile aşınma olayı meydana getiren, katı bir cisim, sıvı ya da gaz olan malzemedir. Karşı malzeme ve özellikleri aşınmanın oluşumunda başlıca öneme sahip sistem bileşenidir.

Ara katman: Birbiri ile etkileşim halinde olan temas ara yüzeylerine yağlayıcı olarak eklenen madde veya ana malzeme üzerine uygulanan koruyucu kaplama tabakaları tribolojik sistemde ara katman olarak değerlendirilmektedir.

Sürtünme yüzeyleri: Birbirine göre izafi hareket yapan iki cismin arasındaki birbirine temas halinde olan yüzeyleridir.

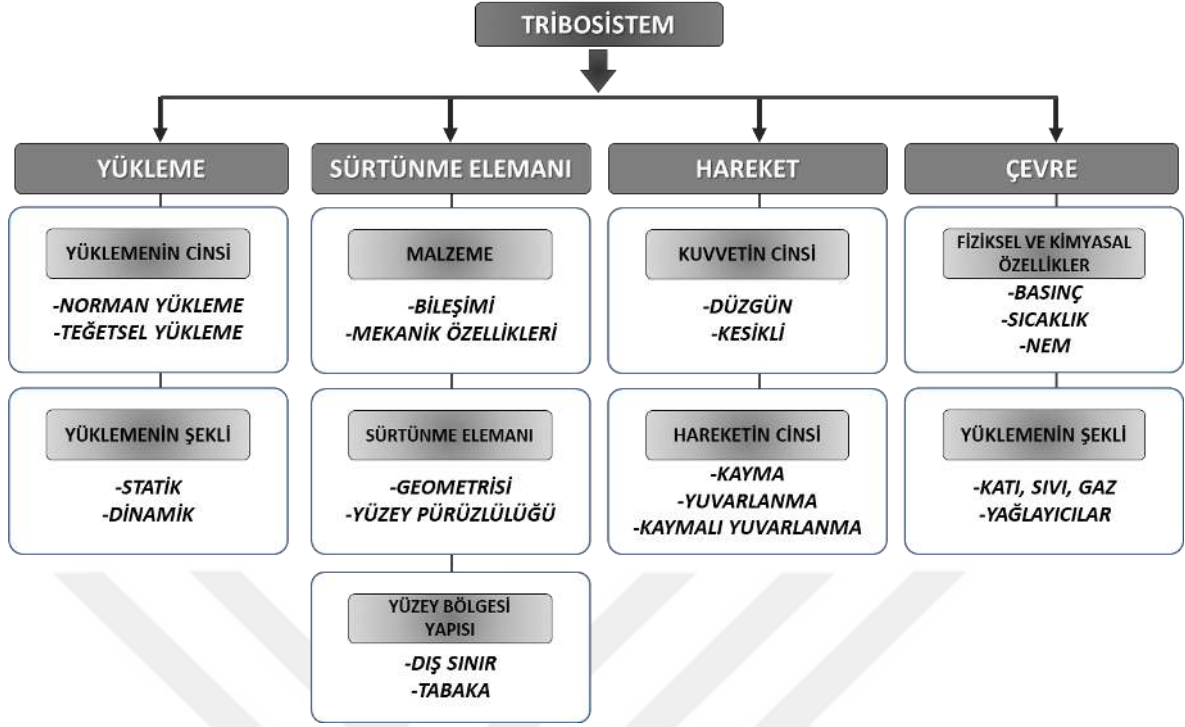
Ara malzeme: Esas aşınan malzeme ile karşı malzeme (aşındıran malzeme) arasında kalan ve katı, sıvı, gaz, buhar veya bunların karışımı şeklinde bulunan maddeye verilen addır [5].

Şekil 1’de temel bir tribolojik sistemin yapısı ve bileşenleri gösterilmektedir. Tribolojik sistem bu bileşenlerin karakteristik özelliklerinden ve birbirleri ile etkileşimlerinden etkilenmektedir. Temas ara yüzeylerine ara katman olarak yağlayıcı veya ana malzeme üzerine koruyucu kaplama uygulanabilmektedir. Ara katman sürtünme yüzeylerinde meydana gelecek olan katı-katı sürtünmesinin önüne geçerek aşınmayı önleyici bir etkiye sahip olmaktadır. Aynı zamanda esas malzeme ve karşı malzeme yüzeyleri arasında dışardan veya aşınma sonucu sistem içerisinde oluşan ara maddeler yer alabilir [5, 6].



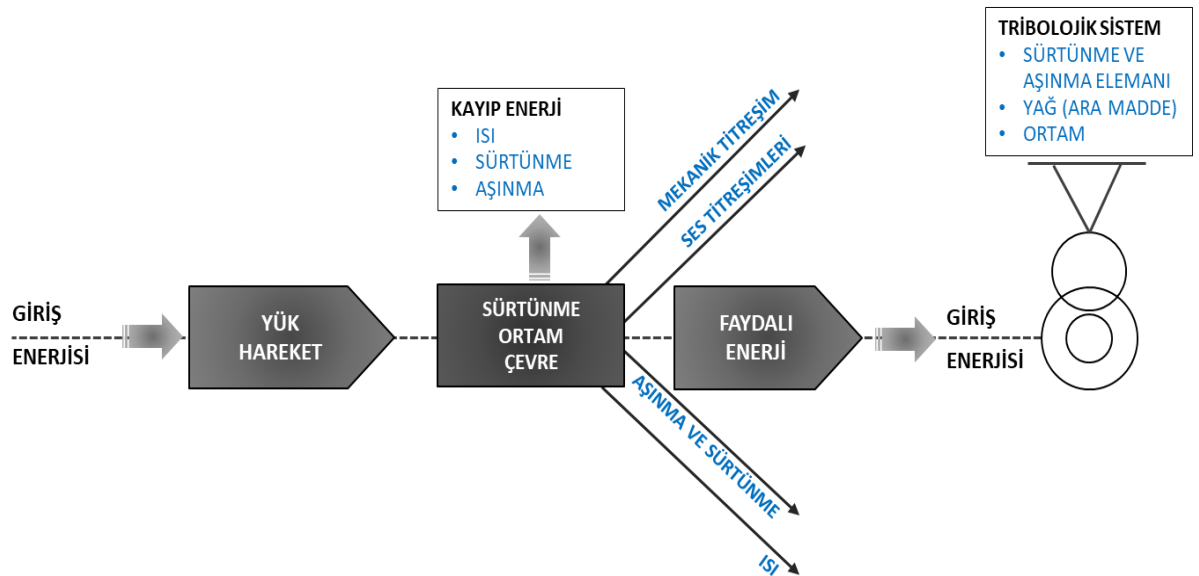
Şekil 1. Tribolojik sistemin yapısı ve bileşenlerinin şematik gösterimi [6].

Şekil 1’de yapısı ve bileşenleri gösterilen bir tribolojik sisteme; yükleme, sürtünme elemanı, hareket ve çevre şartları etki etmektedir. Tribolojik sistem bu etmenlerin biri veya birkaçına aynı anda maruz olabilmektedir. Belirtilen etmenler Şekil 2’ de sınıflandırılmıştır.



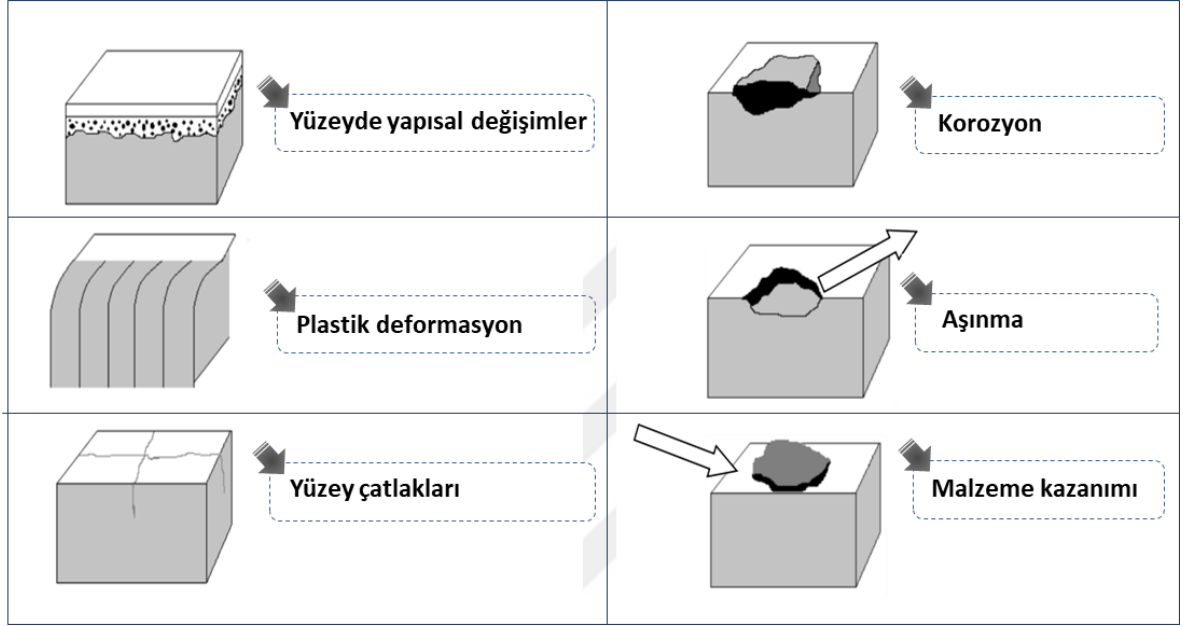
Şekil 2. Tribolojik sisteme etki eden etmenler [7].

Bir tribolojik sistemde ısı, sürtünme ve aşınma kayıpları nedeniyle hiçbir zaman sisteme giren enerjinin tamamı faydalı enerji olarak kullanılamamaktadır. Şekil 3'te tribolojik sistemlerde etkileşim ve tribolojik sistem enerjisi şematize edilmektedir.



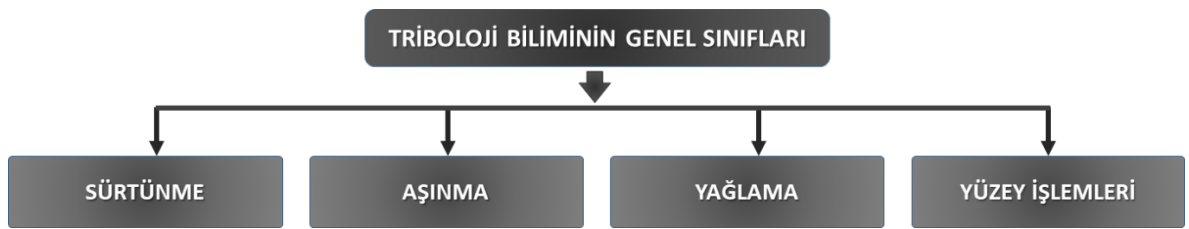
Şekil 3. Tribolojik sistemlerde etkileşim ve tribolojik sistem enerjisi [7].

Tribolojik sistemlerde yüzeylerin etkileşimleri sonucunda yüzey hasar tipleri genel olarak; yüzeyde yapısal değişimler, plastik deformasyon, yüzey çatlakları, korozyon, aşınma ve malzeme kazanımı şeklinde ayrı ayrı veya bu hasarların bir bileşimi olarak meydana gelmektedir. Şekil 4'te tribolojik sistemlerdeki yüzeylerde meydana gelen hasar tipleri şematik olarak gösterilmektedir [8].



Şekil 4. Tribolojide temel yüzey hasar tipleri [8].

2.1. Triboloji Biliminin Genel Sınıfları



Şekil 5. Triboloji biliminin sınıflandırılması

Triboloji bilimi sürtünme, aşınma, yağlama ve yüzey işlemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Triboloji, birbirlerine göre izafi hareket eden yüzeyler arasındaki etkileşimleri sürtünme, aşınma ve yağlama açısından inceleyen bilim ve teknoloji dalı olması nedeniyle triboloji biliminin önemli bir bilimsel çalışma alanını da bahsedilen tribolojik

etkilerin meydana geldiği malzeme yüzeylerine uygulanan yüzey işlemleri oluşturmaktadır. Yüzey işlemleri malzeme yüzeylerinin sürtünme katsayılarının düşürülmesi, aşınma, deformasyon, yorulma ve korozyon dirençlerinin artırılması amaçlarıyla gerçekleştirilmektedir. Yüzey işlemlerinde gerçekleştirilecek gelişmeler sayesinde malzeme yüzey kaliteleri önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Bu amaç doğrultusunda bir tribolojik sistemi temsil edecek şekilde etkileşim halinde çalışan malzeme yüzeylerinin durumunu etkileyen önemli iki faktör olan sürtünme ve aşınma mekanizmaları araştırılarak geliştirilecek yüzey işlemlerine etkilerinin doğru değerlendirilmesi gereklidir [8, 9].

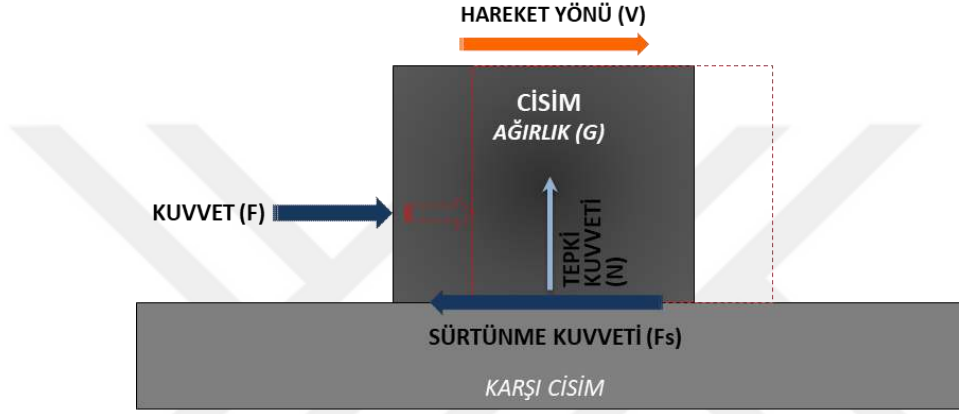
Temas halinde bulunan ve izafi kayma veya yuvarlanma hareketi yaparak etkileşim halinde bulunan birçok makina parçasının iki fonksiyon yüzeyi arasında sürtünme ve aşınma olarak istenilmeyen tribolojik etkiler oluşmaktadır. Bu tribolojik etkiler genellikle sürtünme kayıpları; plastik deformasyon, aşınma, yorulma ve kırılma gibi hasarlar olarak meydana gelmektedir.

Tribolojik sistemlerde birçok halde sürtünmenin sayısal değeri çok küçük olabilir, fakat pratik olarak daima mevcut olmaktadır. Aşınma, malzeme yüzey kalitelerinin geliştirilmesi veya aşınmayı önleyici önlemler olarak tribolojik sistem yüzeyleri arasına yağlayıcılar gibi ara maddelerin ilave edilmesi sayesinde azaltılabilmektedir, ancak bir tribolojik sistemde aşınmanın tamamen ortadan kaldırılması mümkün olmamaktadır [8, 9].

Sürtünme ve aşınma, çok eski tarihlerden beri gözlenen ve uygulamalardaki etkilerinin veya olumsuzluklarının azaltılması yönünde tedbirler alınması için çalışmalar ve araştırmalar yapılan esas konulardandır. Dünyada çeşitli kuruluşlar tarafından yapılan bazı araştırmalar, üretilen enerjinin yaklaşık üçte birinin sürtünme sonunda harcandığı gerçeğini ortaya koymuştur. Diğer yandan makine elemanlarının fonksiyon yüzeylerinde meydana gelen aşınmanın çok büyük ekonomik kayıplara yol açtığı benzer araştırmalar sonucu tespit edilmiştir. Özellikle günümüz teknolojik seviyesi dikkate alındığında, ileri teknolojinin uygulandığı mekanik sistemlerin tasarım aşamasında gerçekleştirilen modelleme veya projelendirme çalışmalarında triboloji biliminin genel dalları olan sürtünme, aşınma ve yağlama boyutlandırma kriter ve parametrelerine dahil edilmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte artan hızlar ve zorlanmalar; mekanik sistemlerin güvenilirlik ve ömür koşullarının daha dar toleranslara sokulmasını, aşınmanın sınırlandırılmasını ve kontrol altında tutulmasını gerektirmektedir. Bu noktada tribolojik etkiler nedeniyle oluşan istenilmeyen durumların ve kayıpların önlenmesi ya da azaltılması her geçen gün daha da önem kazanmaktadır [10].

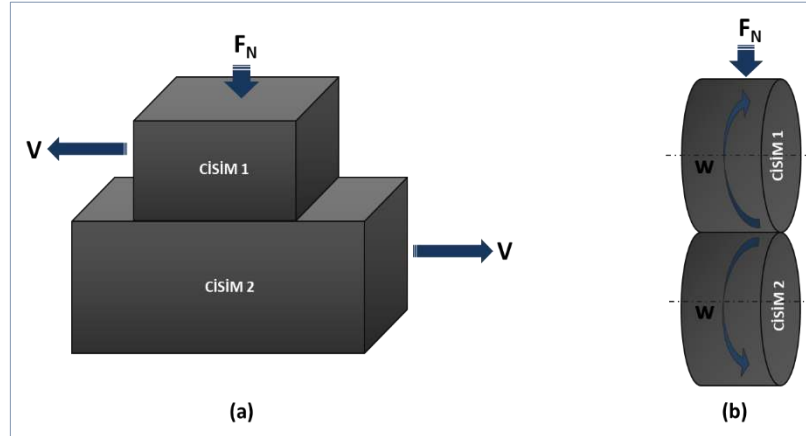
2.1.1. Sürtünme

Temas halinde olan iki nesnenin temas yüzeyleri arasında hareketin yönüne karşı bir sürtünme kuvveti meydana gelir. Sürtünme, birbiriyle izafi hareket yapan ya da yapmaya meyilli iki katı yüzeyin bu sürtünme kuvveti dolayısıyla harekete ya da hareketin ihtimaline karşı göstermiş oldukları direnç olarak tanımlanmaktadır. Şekil 6'da sürtünme mekanizmasının genel olarak şematik görünümü ifade edilmektedir [8, 9].



Şekil 6. Sürtünme mekanizmasının şematik gösterimi [8].

Sürtünmeyi en genel anlamda kayma sürtünmesi ve yuvarlanma sürtünmesi olarak ikiye ayırmak mümkündür. Buna ek olarak bazen hareket kayarak yuvarlanma hareketi olarak meydana gelebilmektedir. Şekil 7'de genel olarak sürtünme mekanizmaları şematik olarak gösterilmektedir.

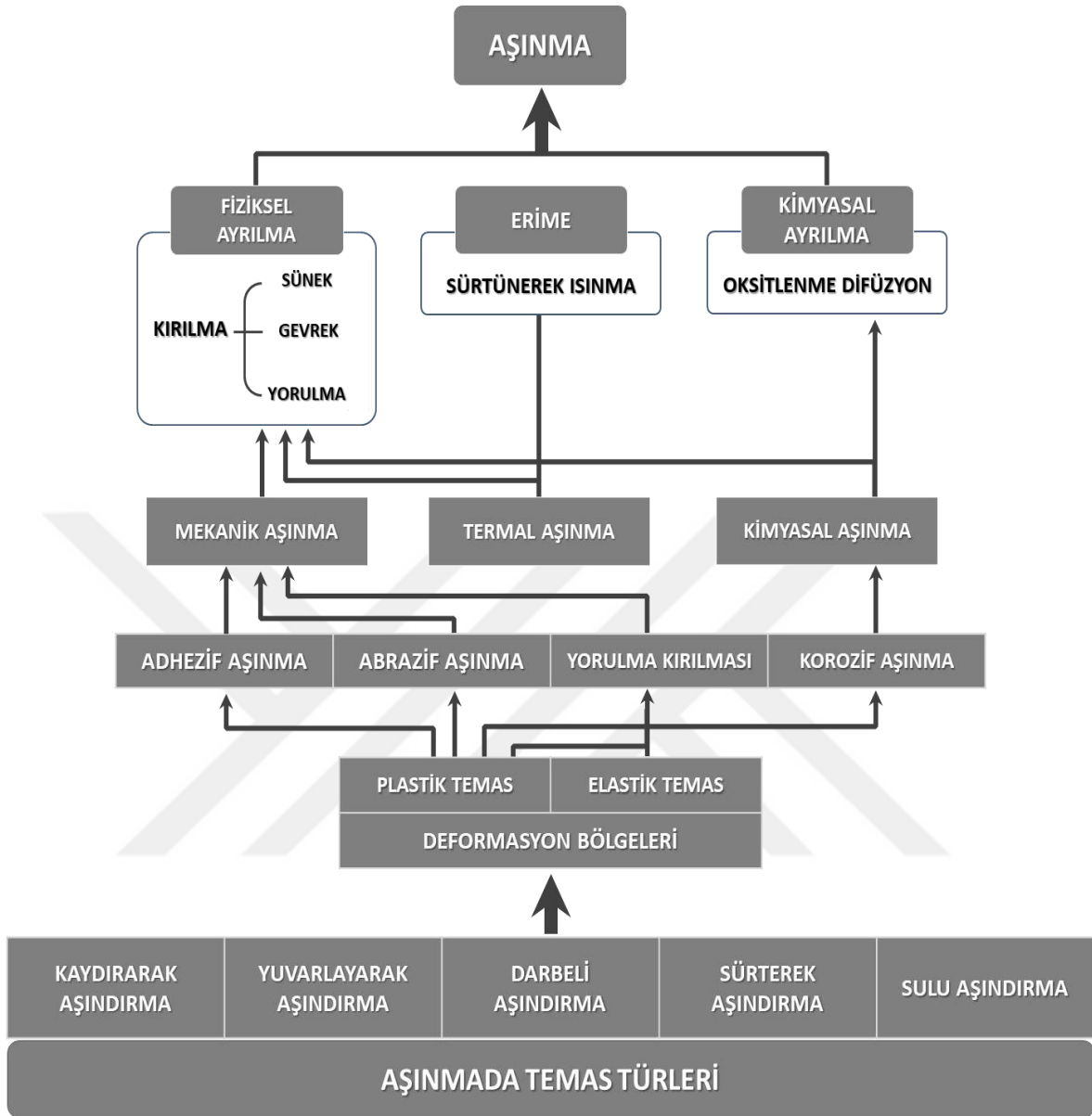


Şekil 7. (a) Kayma sürtünmesi, (b) Yuvarlanma sürtünmesi [11].

Bir tribolojik sistemde meydana gelen sürtünmenin cinsi, sistemde ağırlıklı olarak gerçekleşen kayma veya yuvarlanma hareketinin saptanması ile belirlenmektedir. Kayma sürtünmesinde izafi hareket çizgisel hız (V) ile yuvarlanma sürtünmesinde ise açısal hız (w) ile meydana gelmektedir [11]. Sürtünme meydana gelen bu yüzeylerde sürtünmeye birçok faktör etki etmektedir. Sürtünmeye etki eden etmenler; yüzeylerin kinematiği (hareketin yönü, hızın büyüklüğü), uygulanan dış yük (F_N), yer değiştirme, görünür temas alanı, yüzey topografyası, yüzeylerin birbirlerine göre izafi sertliği, malzemelerin mikro yapısı, tokluğu veya morfolojisi, kayma yüzeyindeki aşınma mahsulleri, sıcaklık ve nem, yağlayıcı ara madde gibi temel faktörlerden oluşmaktadır. Bir tribolojik sistemde sürtünmeye etki eden faktörlerin biri veya birkaçı birlikte etkili olabilmektedir [12, 13, 14, 15].

2.1.2. Aşınma

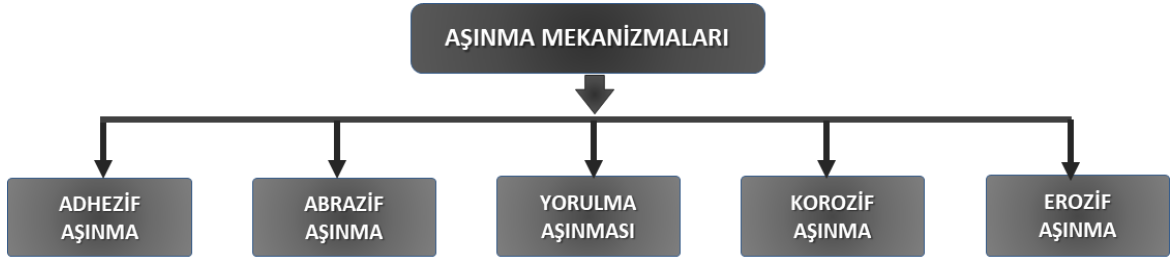
Aşınma birbirine göre izafi hareket yapan iki yüzeydeki bu izafi hareket sonucunda mekanik etkilerle parçacıklar koparak oluşan istenilmeyen malzeme kaybıdır. Bu malzeme kayıpları sonucunda sistemdeki elemanlar zamanla çalışma toleranslarının dışına çıkar ve belirli bir süre sonra hasara uğrar ve çalışma ömürlerini tamamlarlar. Makina elemanlarının fonksiyon dışı kalmasının büyük bir nedenini aşınma teşkil eder. Aşınma sonucu sistem bileşenlerinde oluşan hasar, dolaylı olarak yeni malzemenin temini için gerekli ek bir enerji gereksinimini beraberinde getirir [16]. Sürtünme nasıl enerji kaybı nedeniyse, aşınma da geriye kazanılamayan bir malzeme kaybı nedeni olmakla birlikte sürtünme ve aşınma arasında doğrudan bir ilişki kurmak mümkün değildir. Farklı malzeme çiftleri arasında sürtünme direnci aynı olabilir, ancak bunlar arasındaki aşınma miktarı farklılığı fazla olabilir. Genel olarak aşınma problemi, sürtünme probleminden daha karmaşık bir yapıdadır. Eş çalışan fonksiyon yüzeyleri arasında çok değişik türde aşınma şekillerine rastlanır ve çoğu zaman aynı koşullarda bu değişik şekillerin bir kaçını aynı zamanda kendini gösterebilir. Bu nedenlerle bütün aşınma hallerini veya bir kısmını kapsayan ve genel geçerliliği olan bir aşınma kanununu tanımlamak mümkün olmamıştır [16]. Aşınma genel olarak; zamanla gelişen ve ani oluşan olarak ikiye ayrılır. Söz konusu aşınma şekli, çalışma esnasında oluşan parametrelere ve çalışma koşullarına bağlı olarak farklı mekanizmalar ile gerçekleşir. Aşınma mekanizmalarının çözümüne yaklaşımımızda daha anlaşılabilir olması için aşınmanın gerekli tanımlayıcı anahtar kelimeleri, aşınma mekanizmalarının birbirleri ile ilişkileri ve bunların karşılıklı özellikleri Şekil 8’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 8. Aşınmanın anahtar kelimeleri ve temas tiplerinin tanımlamaları [17].

Farklı aşındırma temas türleri neticesinde yüzeylerde mekanik, termal veya kimyasal aşınma şekilleri meydana gelmektedir. Bu aşınma şekilleri yüzeylerden fiziksel ayrılma, erime veya kimyasal ayrılma şekillerinde telafisi olmayan malzeme kopmasına neden olmaktadır. Genellikle malzemelerde meydana gelen mekanik aşınma etkileriyle makine elemanlarında sünek veya gevrek kırılma ya da yorulma kırılması oluşumuyla hasar meydana gelmektedir. Hasara neden olan aşınma türü ve aşınma mekanizmalarının doğru tespit edilmesi malzemelerin aşınma dayanımlarının artırılması için uygulanacak yöntemlerin belirlenmesinde önemli olacaktır [16].

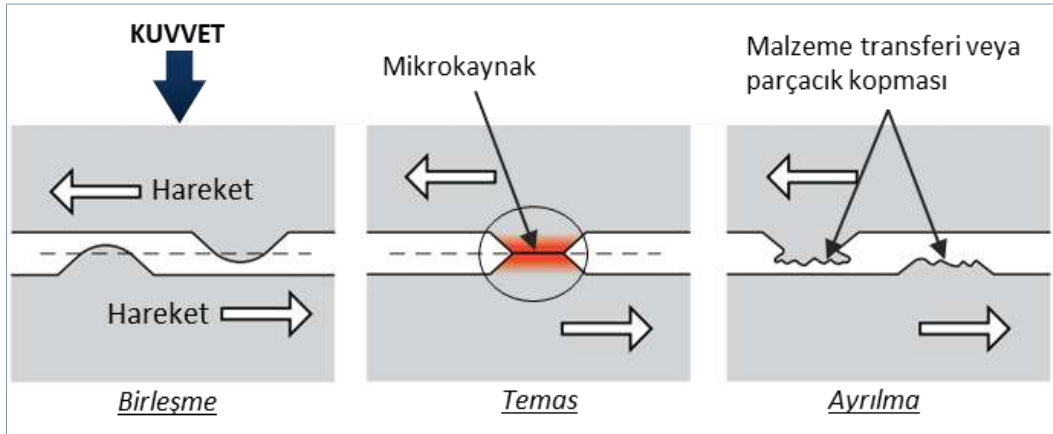
2.1.2.1. Aşınma Mekanizmaları



Şekil 9. Genel aşınma mekanizmaları [18, 19].

2.1.2.1.1. Adezif Aşınma

Adezif aşınma, özellikle birbiri ile kayma sürtünmesi gerçekleştiren malzeme çifti yüzeylerinde pürüz tepelerindeki lokal kaynak bağları ile başlar ve oluşan ‘*kaynama*’ olayının bir sonucu olarak meydana gelir. Temas eden pürüzlü yüzeylerde yüksek basınç nedeniyle pürüz tepeleri arasında mikro kaynak bağlantısı oluşup belirli bir zaman sonra koparak malzeme kaybına neden olur. Şekil 10’da adezif aşınma mekanizması şematik olarak gösterilmektedir [18, 19].



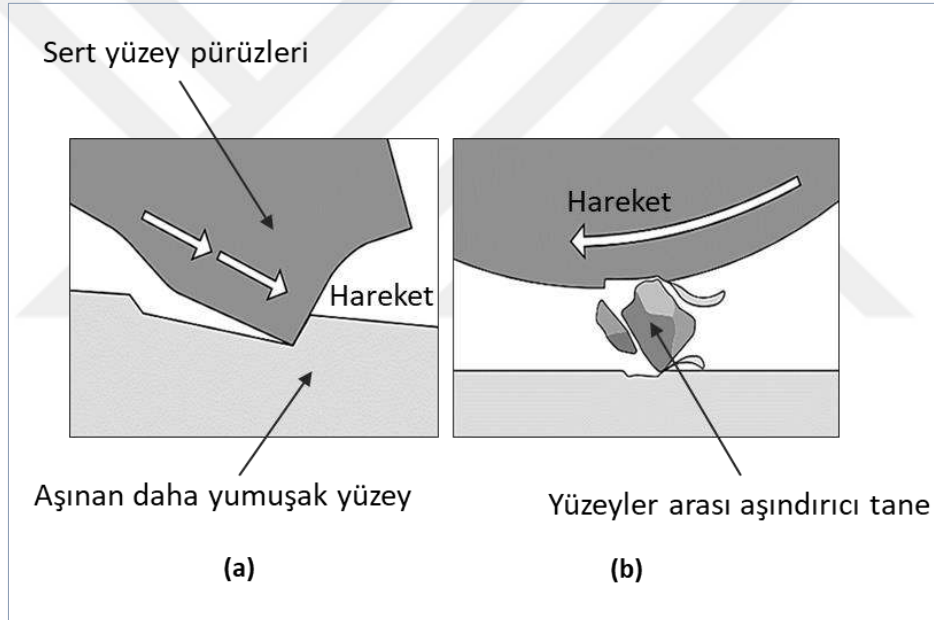
Şekil 10. Adezif aşınma mekanizması [18, 19].

Tabakalar arası hata enerjisi, kristal yapı ve doğal oksit filmi oluşumu gibi bütün parametreler adezif aşınmayı etkiler. Özdeş kristalografik yapıya sahip malzemelerin kullanımı, adezif aşınma (sürtünme aşınması / yapışma aşınması) riskini artırdığı söylenebilir [20]. Adezif aşınma, yüzeye etkiyen normal kuvvet (yük), kayma mesafesi

(yolu) ve aşınan malzemenin sertliği ile orantılıdır [21]. Genel olarak adezif aşınma için alınabilecek önlemler; yağlama, birbiri içinde çözünmeyen metallerin kullanılması, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması ve metal-metal temasının önlenmesi şekilde sıralanabilir [21].

2.1.2.1.2. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, birbiri üzerinde kayan yüzeyler arasında aşındırıcı sert partiküllerin bulunması sonucu meydana gelir. Sürtünen yüzeyler arasında, sert yüzey pürüzlerinin veya tanelerinin yumuşak yüzeyi çizmesi ile üzerinden mikro düzeyde talaş kaldırması şeklinde oluşan aşınma türüdür. Şekil 11’de abrazif aşınma şematik olarak gösterilmektedir.

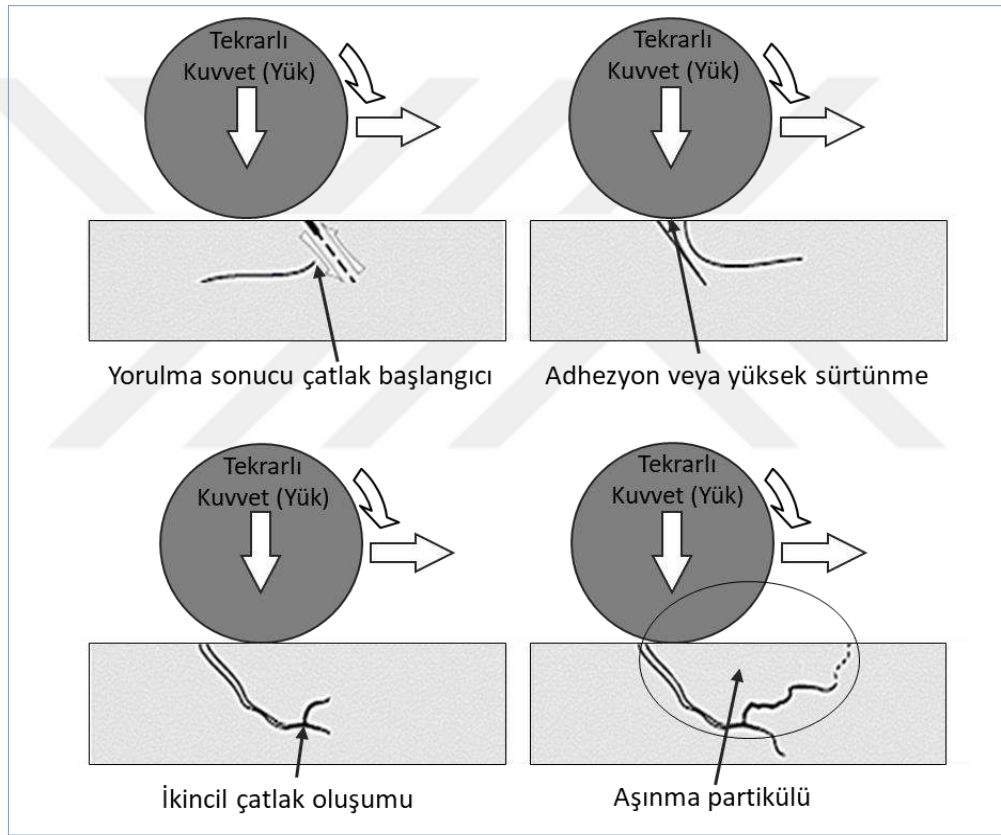


Şekil 11. Abrazif aşınma mekanizmaları; (a) sert yüzey pürüzlerinin daha yumuşak yüzeyi aşındırması, (b) yüzeyler arasındaki sert partiküllerin yüzeyleri aşındırması mekanizması

Sürtünmenin meydana geldiği tribolojik sistemde abrazif aşınmaya neden olan sert partiküller ya dışarıdan sisteme girer ya da adezif aşınma mahsulleri olarak sistem içinde meydana gelir. Yüzeyde meydana gelen yıpranma; yontulma, oyulma, sert fazların (karbürler, borürler) kopması veya matrisin plastik deformasyonu şeklinde kendini gösterir. Bu nedenle, yüzey kaplama yöntemlerinde uygulanacak çözüm; akma-süneklik-sertlik optimizasyonunun oluşturulması olmalıdır [20, 21].

2.1.2.1.3. Yorulma Aşınması

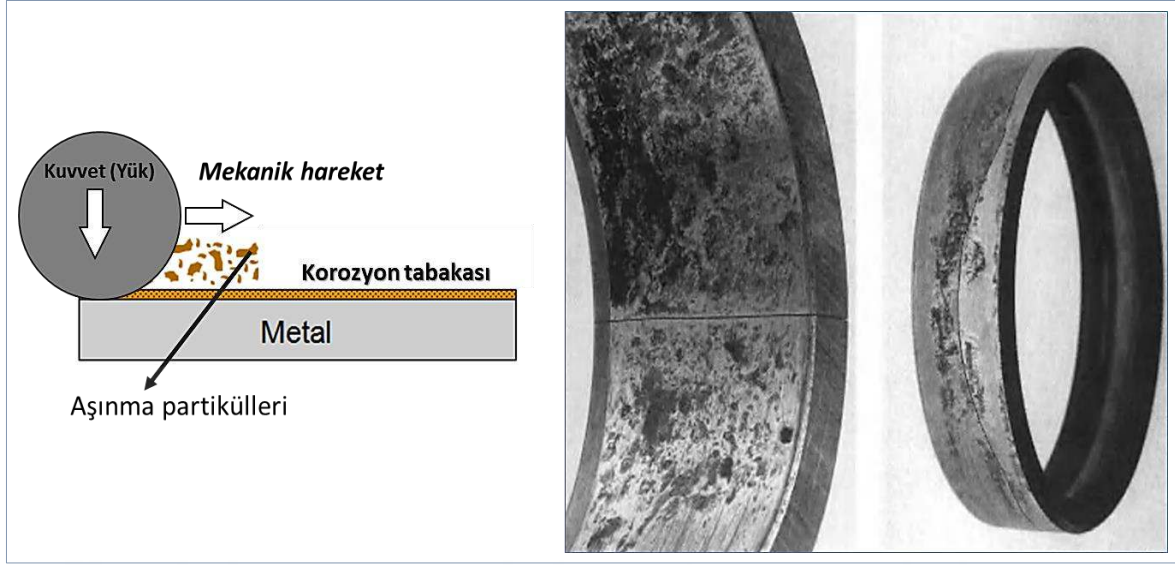
Yorulma aşınması, birbiriyle tribolojik etkileşim halinde olan yüzeylerin tekrarlı bir yüke maruz kalması sonucu malzemenin yüzeyi altında oluşan tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisiyle, yorulma yüzeylerinde mikro-çatlakların gelişmesi neticesinde yüzeyden parçacık koparak malzeme kaybı meydana gelmesi olarak tanımlanmaktadır. Yorulma aşınmasını önlemenin en etkili yolu yüzeylerin sertleştirilmesi veya aynı amaçla sert tabakalar ile kaplanmasıdır [20]. Şekil 12’de yorulma aşınması karakterize edilmektedir.



Şekil 12. Yorulma aşınması mekanizması [20].

2.1.2.1.4. Korozyif Aşınma

Korozyif aşınma, genellikle metal veya metal alaşımlarının çevreleriyle girdikleri kimyasal reaksiyonlar sonucu yüzeylerinde oluşan tabakaların sürtünme sonucu kopmasıyla meydana gelen bir aşınma türüdür. Şekil 13’te korozyif aşınmaya uğramış örnek bir malzeme yüzeyi görseli verilmektedir [22].



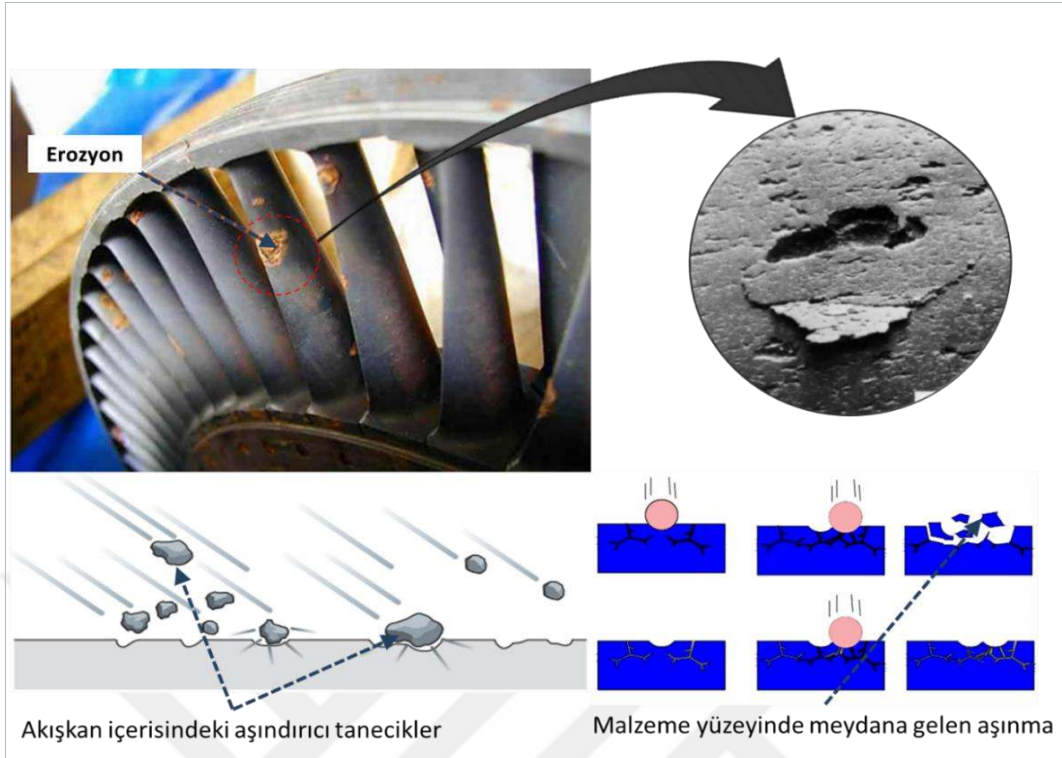
Şekil 13. Korozif aşınmanın meydana geldiği yüzey görünümü [22].

Korozif aşınma mekanizması: Kimyasal Reaksiyon + Mekanik Hareket = Korozif Aşınma, şeklinde ifade edilmektedir [22]. Korozif aşınmasında, aşınma olayı iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşama; temas halinde olan, sürtünen yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve reaksiyon ürünleri yüzeyde bir katman meydana getirir. İkinci aşama: Ardından temas noktasında çatlak oluşumu olur ve/veya abrasif etkilerden dolayı reaksiyon katmanı hasar görür.

Bu aşınma tipinde olumsuz çevre koşulları çok büyük önem taşımaktadır. Ayrıca korozyon aşınmasının neticesinde meydana gelen korozyon ürünleri, aşınma hızını artıran bir etkidir. Korozyon genel olarak mekanik aşınmaya neden olur ama mekanik aşınma her zaman korozyon mekanizmasını etkilememektedir. Korozyon aşınmasında üç-cisimli abrasif aşınma türünden kaynaklı aşınma oranı artar ve kayan, sürtünen yüzeylerin arasındaki sert oksit katmanları da aşındırılmış olur [22].

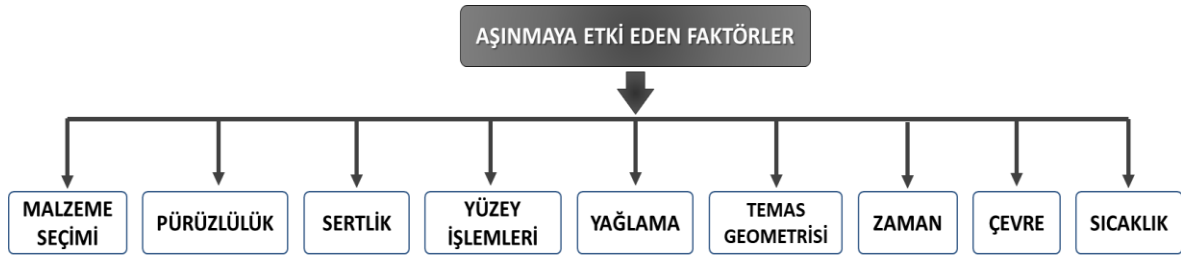
2.1.2.1.5. Erozif Aşınma

Erozif aşınma, içinde katı tanecikler barındıran bir akışkanın malzeme yüzeyine çarpması sonucu meydana getirdiği aşınmaya denir. Diğer aşınma şekillerinde de olduğu gibi, mekanik dayanım aşınma direncini garantilemez ve aşınmayı minimize etmek için detaylı bir malzeme karakteristiği çalışması gereklidir. Erozif aşınma mekanizması ve erozif aşınmaya uğramış bir malzeme yüzey görüntüsü Şekil 14'te verilmektedir [22, 23].



Şekil 14. Eroziv aşınma mekanizması ve eroziv aşınma meydana gelen yüzey görünümü

2.1.2.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler



Şekil 15. Aşınmaya etki eden faktörler [14, 15, 18, 19, 23].

Malzeme seçimi: Birbirleriyle etkileşim halinde çalışan makine elemanlarının aşınma dayanımları malzemelerin tane boyutu, kristal yapısı, elastisite modülü ve deformasyon davranışı gibi mekanik özellikleri ile yakından ilgili olmaktadır. Aynı malzemelerin birbirleriyle kaynaklanabilme kabiliyetleri, farklı malzemelerin birbiriyle kaynaklanabilme kabiliyetinden daha iyidir. Bu nedenle birbirleriyle temas halinde çalışan parçaların malzemelerinin farklı türde seçilmesi adezyon aşınmasına karşı direnci artırmaktadır. Tane boyutuyla malzeme dayanımı doğrudan bağıntılıdır. Tane boyutu ne kadar küçük olursa

malzeme de o kadar tok ve mukavemetli olacağından aşınma dayanımı da yüksek olur. Malzemenin kristal yapısı da aşınma direncini etkileyen faktörlerden biridir.

Pürüzlülük: Malzemelerin aşınma dirençlerini en fazla etkileyen faktörlerden biri yüzeylerin pürüzlülüğüdür. Gerçek yüzey temas alanını yüzeyler arasında pürüzlerin temas ettiği alanın temsil etmesi dolayısıyla yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin adezyon kuvvetlerinin artmasındaki rolü önemlidir. Sürtünme kuvvetleri, yüzeylerin görünür temas alanını artırmasından dolayı pürüzlülüğü fazla yüzeylerde daha fazla olmaktadır. Aynı zamanda sürtünme kuvveti değerine etki eden yüzeylerin pürüzlülük değerleri iki yüzey arasında meydana gelen aşınmayı doğrudan etkilemektedir.

Sertlik: Malzemelerde diğer etkenler sabit kalmak koşuluyla sertliğin artırılması ile aşınma miktarı genelde azaltılmış olur. Abrasif aşınma direnci genellikle malzemenin sertliği ile doğru orantılıdır. Aşınmaya karşı dayanımını arttırmak için malzeme yüzeyleri ısıtma işlemleri, alaşımlandırma yöntemleri veya yüzey kaplama teknikleriyle sertleştirmelidir.

Yüzey işlemleri: Malzemelerin yüzey yapısı aşınma direncini etkilemektedir. Malzemelerde aşınma dayanımının artırılması için, temas halinde çalışan iki metal arasındaki sürtünme katsayısının azaltılması gerekmektedir. Bu nedenle yüzeylere uygulanan birtakım yüzey işlemleri sayesinde aşınma dayanımları artırılmaktadır.

Yağlama: Yağlama işlemi sayesinde birbirine sürtünen yüzeyler arasındaki metal-metal sürtünmesi yerine sıvı-metal sürtünmesi sağlanmaktadır. Bu sayede sürtünmeden kaynaklanan aşınmanın büyük oranda önüne geçilebilmektedir.

Temas geometrisi: Birbiri ile temas halindeki malzemelerin temas geometrileri aşınma miktarına etki eder. Örneğin aşınma artıklarının iki yüzey arasından dışarı çıkmalarının kolay olduğu temas geometrilerine sahip yüzeylerde meydana gelen abrazif aşınma azalır.

Zaman: Uygulanan kuvvetin frekansına, devir sayısına ve toplam zamana bağlı değişken kuvvetler metal yüzeylerde yorulma aşınması oluşturmaktadır.

Çevre: Sıcaklık, nem, ortamda bulunan gazlar ve atmosfer gibi çevre koşulları aşınma miktarına etki etmektedir. Atmosferde bulunan oksijen nedeniyle yüzeyde oluşan oksit tabakasının sürtünme esnasında koparılması nedeniyle aşınma meydana gelir. Ayrıca bağıl nem oranı azaldıkça aşınma miktarı artmaktadır. Atmosferdeki nem oranının yükselmesi, sürtünme katsayısının azalmasına ve buna bağlı olarak da genelde aşınma miktarının azalmasına sebep olur.

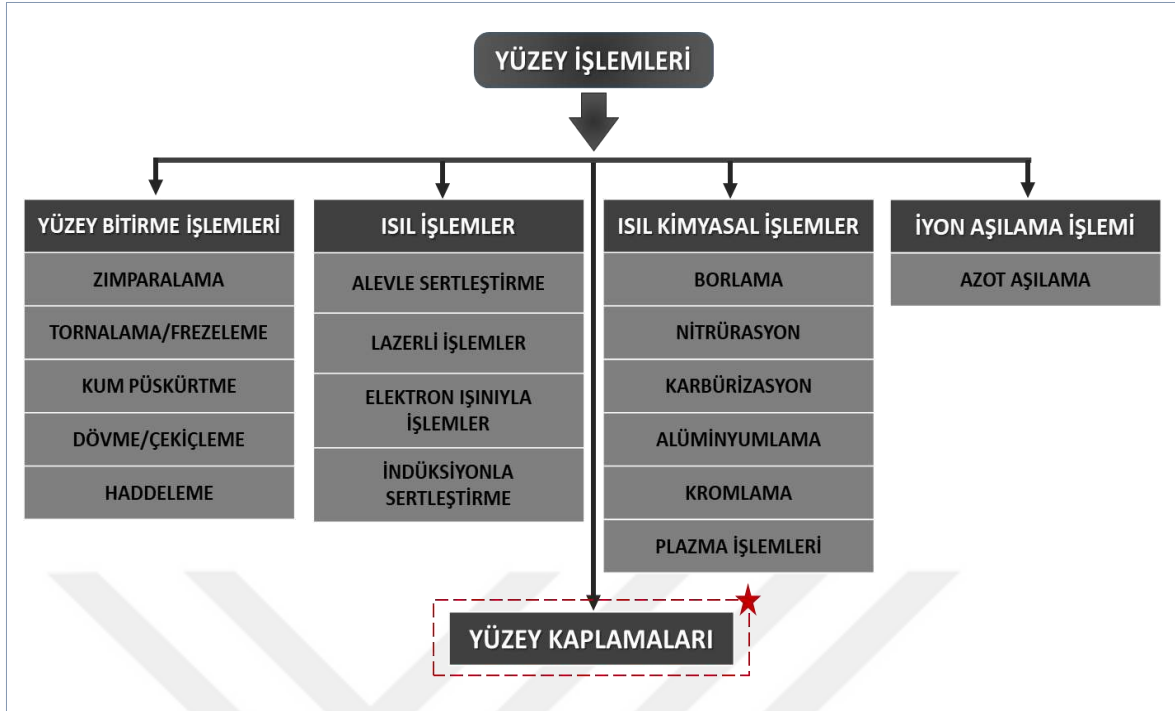
Sıcaklık: Sürtünen yüzeylerin meydana getirdiği sıcaklığın artmasıyla yüzey sertliği azalmış olur ve buna bağlı olarak yüzeylerde oksidasyon gerçekleşir. Gerçekleşen söz konusu oksidasyon da plastik deformasyonun kolaylaşmasına sebep olur. Yapılan araştırmalar neticesinde, belli bir sıcaklık değerine kadar aşınma direncinin etkilenmediği, ancak kritik bir sıcaklık değerinin üzerine çıkıldıkça aşınmanın arttığı görülmüştür [14, 15, 18, 19, 23].

2.1.3. Yağlama

Sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı kısmen ya da tamamen önlemek ve sıcaklığın yükselmemesini temin etmek gayeleriyle birbirlerine temas eden makine elemanları arasında yağlayıcılar kullanılır. Sürtünen yüzeyler arasına sürtünme ve aşınma etkilerini değiştirmeye yönelik harici maddeler ilave edilmesi işlemine yağlama denir. Yağlayıcılar; katı, yarı katı (gresler), sıvı ve gaz yağlayıcılar olarak dört gruba ayrılır. Yağlayıcı maddeler yağlama görevlerinin yanında pek çok halde oluşan ısıyı yatak bölgesinden uzaklaştırır. Bununla birlikte korozyon ve paslanmaya karşı da bir koruyuculuk görevinde bulunur [24, 25]. Aşınmayı önlemek için kullanılan yağların kayma mukavemetleri düşük olmalı, kullanıldığı yerde koroziyon etki yaratmamalı, bu yağlar malzeme yüzeyinde oksit tabakasına sebebiyet vermemeli, kendi özelliklerini muhafaza edebilmeli ve sıcaklıktan etkilenmeden görevini devam ettirebilir özellikte olmalıdır [23].

2.1.4. Yüzey İşlemleri

Yüzey işlemleri, malzeme yüzeylerinin özelliklerinin farklı amaçlara yönelik olarak değiştirilmesi yöntemlerinin geneli olarak ifade edilebilir. Malzemelerin birbirleri ile ve çalıştığı ortamla etkileşimlerinde servis ömürlerini, performanslarını ve verimliliklerini artırmak amacıyla pek çok yüzey teknolojisi geliştirilmiştir. Özellikle aşınma gibi tribolojik problemleri ortadan kaldırmak amacıyla aşınmaya dirençli özelliklere sahip daha kaliteli yüzeyler oluşturulması için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler arasında yüzey kaplama tekniği malzemelerin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadır [26]. Malzemelerin yüzey özelliklerinin değiştirilmesi veya yüzeylerinin kalitesinin iyileştirilmesi için uygulanan yüzey işlemleri genel olarak Şekil 16'da sınıflandırılmıştır.



Şekil 16. Yüzey işlemlerinin genel sınıflandırılması [26].

Şekilden görüldüğü üzere, yüzey işlemleri genel olarak yüzey bitirme işlemleri, ısı işlemler, ısı kimyasal işlemler, iyon aşılama işlemleri ve yüzey kaplamaları olarak sınıflandırılmaktadır. Makine elemanları yüzeyleri kullanım alanı faktörüne ve şartlarına bağlı olarak zımparalama, tornalama veya frezeleme, kumlama, dövme ya da çekiçleme ve haddeleme işlemleri uygulanarak yüzey bitirme işlemine tabi tutulur. Aynı zamanda malzemelerin yüzeylerinden beklenen kalite özelliklerini sağlamaları amacıyla yüzeylerine alevle sertleştirme, lazerli işlemler, elektron ışınıyla işlemler ve indüksiyonla sertleştirme yöntemleri ile ısı işlemler uygulanabilmektedir. Kimyasal işlem olarak malzeme yüzeylerinin borlama, nitrürasyon, karbürizasyon, alüminyumlama, kromlama ve plazma işlemleri gibi çok çeşitli işlemlerle birlikte daha üstün yüzey özelliklerine sahip olmaları sağlanabilmektedir. Endüstride oldukça yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan azot aşılama yöntemi ile malzeme yüzeyleri özellikle tribolojik etkilere karşı üstün özellikler kazandırılmaktadır. Yüzey işlemleri arasında bu çalışmanın da alanını temsil eden yüzey kaplama teknikleri çok çeşitlidir. Yüzey kaplama işlemleri endüstriyel uygulamalarda elde edilmek istenilen iyileştirmeler doğrultusunda birçok farklı amaç için uygulanabilmektedir. Yüzey kaplama tekniklerindeki gelişmeler sayesinde makine elemanlarının özellikle kalitesi, verimliliği ve ömürlerinde önemli iyileştirmeler sağlanmaktadır [26].

3. YÜZEY KAPLAMA TEKNİĞİ

Yüzey kaplama teknikleri, yeni bir yüzey tabakası elde etmek amacıyla kimyasal bileşimi bilinen ana malzemeden farklı özellikteki bir metal veya alaşımla malzemelerin bir kısmının veya tamamının yüzeylerinin uygun kaplama yöntemleri kullanılarak kaplanması tekniklerini kapsayan yüzey işlemlerinin genelidir. Kaplama yöntemi; sistem bileşenlerinin çalışma performansı, kalitesi, güvenilirliği ve ömürleri bakımından öneme sahip bir uygulamadır. Genel olarak bir malzeme yüzeyinin metalürjik, mekanik, fiziksel veya kimyasal özelliklerinin değiştirilmesi; bir malzemenin dekoratif, elektrik ve ısı özelliklerinin iyileştirilmesi; malzemelerin sürtünme, aşınma, korozyon, yorulma, oksidasyon, yıpranma, erozyon, oyulma hasarlarının azaltılması; darbe direncinin artırılması ve yüksek sıcaklığa dayanıklı yüzey kalitelerinin elde edilmesi amaçlarıyla yapılmaktadır. Yüzey kaplama işlemleri mimari, dekoratif, estetik, inşaat, gıda, mekanik, otomotiv, havacılık ve elektrik-elektronik gibi birçok farklı alanda uygulanmaktadır [7, 27, 28].

Teknolojik gelişmelerin bir gerekliliği olarak günümüzde artan rekabet ortamında kalitenin artırılması, enerji ve malzeme sarfiyatının azaltılarak enerji tasarrufu sağlanması ve verimliliğin, dolayısıyla maliyetlerin iyileştirilmesi için kaplama teknolojilerindeki gelişmeler kuvvetli bir etkiye sahip olmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda, gelişen teknolojinin ihtiyaçlarına cevap verebilecek ürünlerin üretilmesinde kaplama tekniklerinin büyük bir payı bulunmaktadır. Kaplama teknolojileri, günlük hayatımızda kullanılan birçok eşya ya da malzemede uygulama alanına sahip olduğu gibi endüstriyel uygulamalarda da çok önemli bir yere sahiptir. Makine elemanlarının özellikle servis ömürlerinin ve üretim kalitelerinin artırılması, performanslarının geliştirilmesinin sağlanması amaçlarıyla çalışma şartlarının özellikleri dikkate alınarak özellikle aşınma davranışlarının iyileştirilmesine yönelik yapılan son yüzey tabakası oluşturma işlemleri endüstride imalat sektöründe önemli bir uygulama alanıdır. Üretilen ve kullanıma sunulan mekanik sistem bileşenleri farklı çalışma şartlarına sahip olabilmektedir ve malzemenin kendisinden beklenen performans özellikleri dikkate alındığında beklentileri karşılayacak bir kaplama yönteminin belirlenmesi ve uygulanması belirleyici esas ölçüt olmaktadır. Endüstriyel kaplama yöntemleri çok çeşitlidir ve farklı detay amaçlara hizmet etmektedir. Bu çalışmada ele alınacak ve gerçekleştirilecek yüzey kaplama yöntemleri tribolojik amaçlarla geliştirilen kaplama yöntemleri olacaktır [7, 27, 28].



Şekil 17. Yüzey kaplama tekniklerinin genel sınıflandırılması [29].

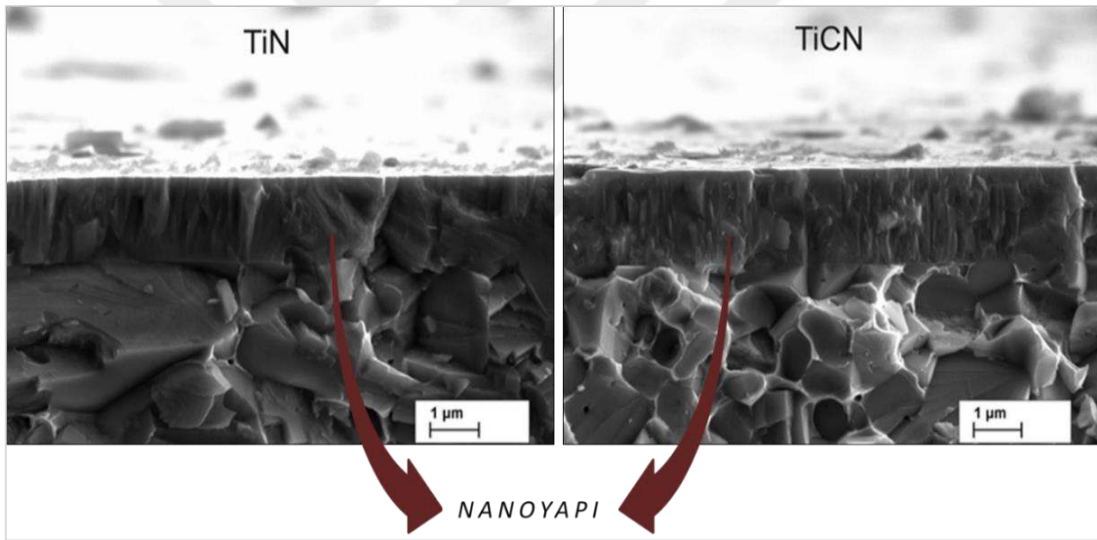
3.1. Tribolojik Amaçlı Kaplamalar

Tribolojik iyileştirme amacı doğrultusunda yapılan kaplamalar, kaplama tekniklerinin en önemli alanını oluşturduğu söylenebilir. Bilimsel çalışmalar ile endüstride makine elemanlarından beklenen tribolojik özelliklerin sağlanması amacıyla kaplama yöntemlerinin ve kaplama özelliklerinin iyileştirilerek ileri seviyelere ulaştırılması adına her geçen zaman önemli gelişmeler sağlanmaktadır. Aşınma kaynaklı hasarlardan ve maliyet kayıplarından oluşan giderleri azaltmak, ürünlerin kullanım ömürlerini, verimliliklerini ve kalitelerini artırmak için çok daha profesyonel tribolojik amaçlı kaplama yöntemleri geliştirilmektedir [7, 27, 28].

Endüstriyel uygulamalarda farklı üretim alanlarında ya da süreçlerinde yüzey kaplamalarından beklenen tribolojik özellikler farklılık gösterebilmektedir. Her alanda tribolojik kaplama performansını etkileyecek etkiler değişken olmaktadır. Kaplamaların beklenen performans değerlerinde olması farklı alanlardaki etkilerin ve kullanım şartlarının dikkate alınarak incelenmesini ve analiz edilmesini gerekli kılmaktadır. Tribolojik amaçlı yüzey kaplamalarının geliştirilmesi bu etki ve şartlar dikkate alınarak bilimsel çalışmaların amaç ve yöntemlerinin önceden değerlendirilip belirlenmesi sayesinde gerçekleştirilir. Aynı düşünceler doğrultusunda, kaplama işlemlerinin performanslarının dikkate alınması yanında ekonomik olmaları da aynı derecede önemli bir parametre olmaktadır [7, 27, 28].

3.1.1. Tribolojik Amaçlı Nanoyapılı Sert Kaplamalar

Nanoteknoloji, malzemelerin moleküler yapısını, içyapı özelliklerini değiştirmekle ilgili devrim niteliğinde bir teknolojik gelişmedir. 1 nanometre; (nm) bir metrenin milyarda birine eşittir. Genel olarak nanoteknolojinin çalışma alanı 1 nm ile 100 nm arasında olmaktadır. Şekil 18’de Titanyum (Ti) esaslı kaplamaların nano-yapısal görüntüleri örnek olarak verilmektedir. Temel olarak, nano ölçeklerde maddelerin anatomik yapılarına müdahale edilerek moleküler yapılarındaki değişikliklerle malzemede ve üretim tekniklerinde yeniliklere adım atmak ve bambaşka ürünler ve maddeler geliştirmek mümkün olmaktadır. Nanoteknoloji ile moleküler boyutlarda yeni malzeme teknolojilerinin de gelişmesiyle nanoyapıya sahip malzemeler benzersiz optik, elektronik veya mekanik özelliklere sahip olmaktadır [30, 31].



Şekil 18. TiN ve TiCN kaplanmış malzemelerin yapısal görünümü [31].

Nanoteknolojinin alanı oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir ve her geçen gün daha da genişlemektedir. Nanoteknoloji bütün bilimsel alanlardaki gelişmeleri yakından etkilemektedir. Günümüzde kimya, fizik, biyoloji, bilgisayar, elektronik, çevre ve enerji, tıp ve sağlık sektörü gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Ayrıca malzeme ve imalat sektörü, havacılık ve uzay araştırmaları, savunma sektörü ve biyoteknoloji, tarım ve gıda alanı, önemli nanoteknolojik bilimsel araştırma alanlarıdır. Nanoteknolojinin son yıllarda gelişen uygulama alanlarından birisi olarak da yüksek performanslı nanoyapılı sert kaplamalar öne

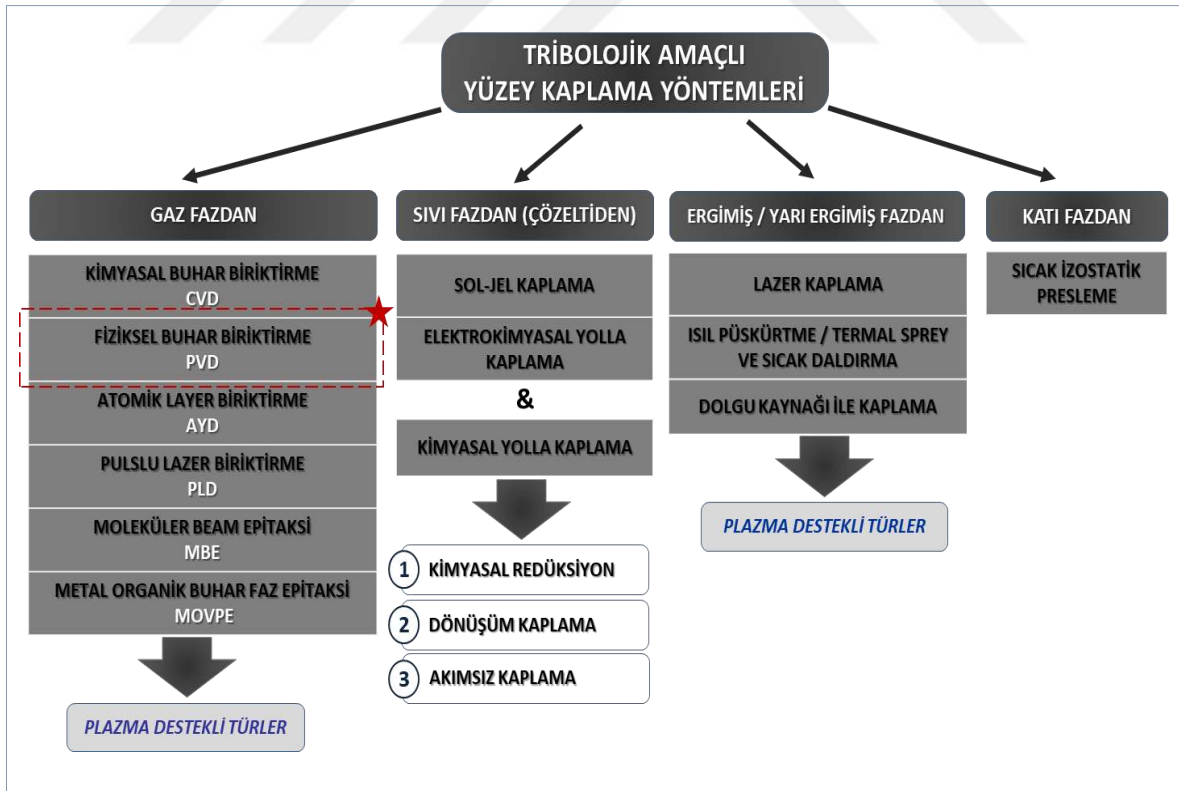
çıkılmaktadır. Nanoteknolojik gelişmeler sayesinde kaplamanın istenilen özelliklerde olması ve yüksek performanslı kaplamaların geliştirilmesi sağlanmaktadır.

Nanoteknoloji ürünü olan nanopartikül veya nanoyapıların yapısı içerdiği bileşimler sonucu değiştirilebilmekte ve bunun sonucunda da kaplandığı yüzey kalitesini oldukça geliştirmektedir. Ancak, tüm beklentileri aynı anda en üst düzeyde karşılayan tek çeşit bir kaplama mevcut değildir. Uygulama şartlarına bağlı olarak ve kaplamadan beklenen performans özellikleri doğrultusunda kaplamanın bazı özelliklerinin öne çıkması sağlanmaktadır. Örneğin TiN esaslı nanoyapılı kaplamalar ile yüksek aşınma direnci elde edilebilmektedir. Farklı kaplama performans özellikleri için kaplama bileşimine çeşitli geçiş metalleri ilave edilerek farklı kombinasyonlar geliştirilmektedir [32].

3.1.2. Tribolojik Amaçlı Yüzey Kaplama Yöntemleri

Birbirine temas halinde olan ve bağlı kayma hareketi yapan malzeme yüzeylerinde meydana gelen aşınma ve sürtünme, mekanik sistemlerin efektif ömrü ve enerji kayıpları açısından en önemli iki parametredir. Makina parçalarının, ekstrüzyon veya dövme ile üretim yöntemlerinde kullanılan kalıp elemanlarının ve imal usullerinde yoğun olarak kullanılan kesici takımların kullanım süreleri aşınma nedeniyle sınırlı olmaktadır. Aşınan elemanların kullanım ömürlerinin kısa olması, hammadde kullanımını artırarak ekonomik kayıp olarak ortaya çıkmaktadır. Günümüzde aşınma nedeniyle üretim tezgâhlarının durma süreleri de maliyet faktörünü devamlı artırmaktadır. Bu sebeplerle endüstriyel uygulamalarda birçok alanda karşımıza çıkan sürtünme ve aşınma kaynaklı problemleri azaltmak veya kontrol altına almak için malzemelerin yüzeylerinin mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapılması veya temas yüzeylerinin sert malzemeler ile kaplanması gibi yöntemler uygulanmaktadır. Kullanılan takım ve kalıp parçalarını daha pahalı olan yenileriyle değiştirmek yerine, parça yüzeyinin sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek soruna ekonomik ve daha pratik bir yaklaşım getirmektedir. Yüzey kalitelerinin beklenen performanslara getirilebilmesi, teknolojik ve ekonomik amaçlar yönünde parçaların aşınma ve korozyon dirençlerinin artırılması için ince sert yüzey kaplamaları önemli bir bilimsel çalışma alanı olmaktadır [33, 34]. Kesme takımları ve kalıplar üzerine kaplanan sert kaplamalar malzemelerin tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi yönündeki en başarılı uygulamalardandır. Sert kaplamalar, yüzeylerin sertlik, sürtünme, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi özelliklerini iyileştirmek için kaplanacak taban malzeme üzerine biriktirilen fakat kaplanan malzemenin

özelliklerini değiştirmeyen ince kaplama tabakalarıdır [30]. Günümüze kadar çok çeşitli malzemeler ve malzeme kombinasyonları kullanılarak sert kaplamaların üretimi gerçekleştirilmektedir. Sert kaplama malzemeleri olarak genellikle geçiş metallerinin nitrürleri, karbürleri, borürleri ve oksitleri kullanılmaktadır [30, 35]. Bu kaplamalar yüksek sıcaklıklarda yüksek sertliğe ve düşük iç gerilmelere sahip olduğundan dolayı ve yüzeye tutunma kabiliyetleri yüksek olduğu için aşınmaya karşı iyi bir koruma sağlarlar. Endüstriyel alanda sert kaplamalar, takımlar (kesici ya da şekil verme takımları gibi) ve makine elemanları (dişli çarklar, yataklar gibi) üzerine biriktirilmektedirler. Sert kaplama tekniğinde hedeflenen temel amaç, kaplanan elemanların yüzeylerinin aşınma dayanımlarını artırarak ömürlerini uzatmak, işlem kalitelerini iyileştirmek, kaplamaların yağlayıcılık özelliği sayesinde yağlayıcı tüketimini azaltmak, verimliliği artırmak ve farklı mekanik özelliklerde ya da sert malzemelerin işlenebilmesini sağlamaktır [36]. Tribolojik amaçlarla gerçekleştirilen kaplama yöntemleri Şekil 19’da sınıflandırılmış olarak verilmektedir. Yüzey kaplama yöntemleri genel olarak gaz fazdan, sıvı fazdan, ergimiş/yarı ergimiş fazdan ve katı fazdan olarak dört gruba ayrılarak incelenmektedir.



Şekil 19. Tribolojik amaçlı yüzey kaplama tekniklerinin kullanılan kaplama malzemesinin fiziksel durumuna göre sınıflandırılması [7, 27].

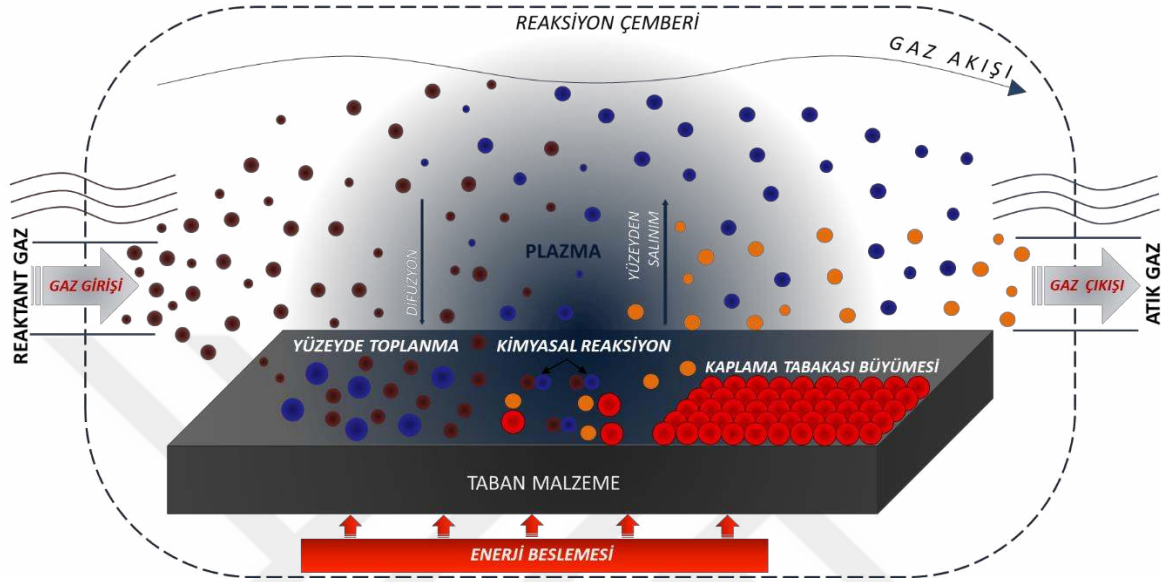
Plastik şekil verme operasyonlarında kalıp ve makine yüzeyleri yüksek sıcaklıkla birlikte korozyon maddelerinin etkilerine ve abrazyon etkisi olan zerreçiklerden oluşan zorlu çalışma ortamlarına maruz kalmaktadırlar. Bu ortam şartları, makine parçalarının servis ömürlerini kısaltmakta ve imalat kalitesi ile verimliliği düşürmektedir. Kokil kalıba döküm, ekstrüzyon ve dövme gibi şekil verme proseslerinde kullanılan araç-gereçlerin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi endüstriyel imalat sektöründe bir odak noktası haline gelmektedir. Son yıllarda takım çelikleri ve bu çeliklerden imal edilen donanım ve takımların yüzey özelliklerini geliştirmek için birçok bilimsel çalışma yapılmaktadır ve günümüzde sert ince kaplamalara hem bilimsel hem de teknolojik olarak yoğun ilgi duyulmaktadır.

Sert ince kaplamaların makine elemanlarına, kalıp ve takım yüzeylerine başarıyla uygulanabildiği yöntemlerin başında PVD ve CVD kaplama teknikleri gelmektedir. PVD ve CVD yöntemleri, gaz fazdan malzeme yüzeylerine ince sert kaplama yapılması amacıyla geliştirilmiş iki farklı temel yöntemdir. PVD ve CVD kaplama yöntemlerinde kullanılan elementlerin çeşitli varyasyonları ile kaplamalardan farklı tribolojik özellikler elde edilerek malzemelerin yüzey kalitelerinin artırılması amaçlanır. PVD ve CVD kaplama yöntemleri ile düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci, yüksek yüzey sertliği, yüksek termal dayanıklılık, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ve erozyona dayanıklılık, elektriksel özellikleri değiştirmek, kimyasal kararlılık sağlamak gibi amaçlar hedeflenmektedir. Bu sayede; kullanım ömrünü uzatmak ve maliyetleri düşürmek, daha iyi parça yüzey kalitesi ve daha hızlı parça üretimi sağlamak, işlem sırasında soğutma sıvısı kullanımını en aza indirmek gibi temel sonuçlar hedeflenmektedir. Bu yönde birçok farklı alaşım ile tek fazlı veya çok fazlı ve tek katmanlı veya çok katmanlı kaplamalar oluşturulmaktadır. Bu amaçlara yönelik olarak, yeni tür sert ince kaplamaların geliştirilmesi, var olan kaplama türlerini kullanarak çok tabakalı kaplama uygulamaları ve sert kaplamaların üzerine sürtünme özelliklerini geliştirici ek sert bir tabaka uygulaması gibi konularda çalışmalar sürdürülmektedir [37, 38, 39].

3.1.2.1. Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemi

CVD olarak bilinen Kimyasal Buhar Biriktirme yöntemi sürecinin temelinde genellikle gaz fazında olan kimyasal tepkimelerin kaplanacak ana malzeme üzerinde biriktirilmesiyle oluşturulur. Dolayısıyla malzeme yüzeyinde çok özel nitelikli çok ince sert tabakalar oluşturulmuş olur. Şekil 20’de gösterildiği şekilde gaz fazındaki elementlerin kimyasal

reaksiyon oluşturarak oluşan bileşiklerin taban malzemesi yüzeyinde mükemmel kristal yapılarda birikmesi sayesinde yüzeyin kaplanması şeklinde uygulanan bir yöntemdir. CVD kaplama işlemi süreci aşamaları genel olarak Şekil 21’deki gibidir [7, 40, 41].



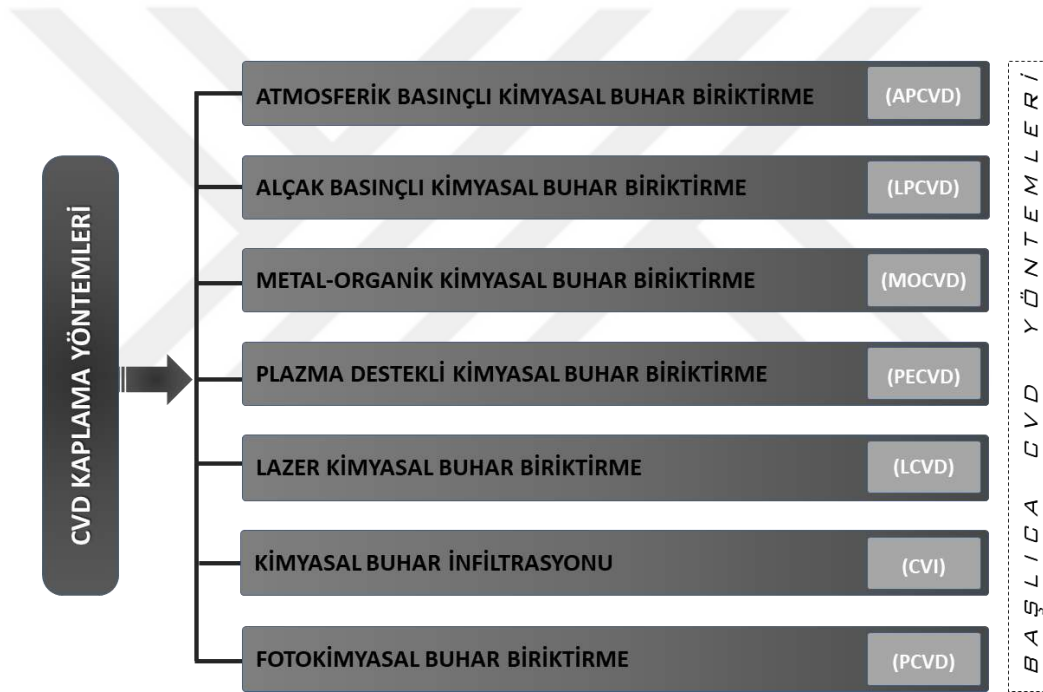
Şekil 20. CVD yönteminin genel olarak uygulama prensibinin gösterimi



Şekil 21. CVD kaplama sürecinin genel akış şeması [42].

Uygulama, bir kapalı alan içerisine kimyasal gazların salınmasıyla, bu gazlar arasında ortamda meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucu, kaplanacak yüzeyde ince kaplama tabakaları oluşturma yöntemidir. Kimyasal gazlar ortama girer ve yüzeyde bir gaz bulutu meydana gelir. Kimyasal reaksiyonlar sonucu yüzey üzerinde kümelenmeler oluşur. Bu gaz bulutu kümeleri birleşerek sürekli ince film tabakası oluşturma eğilimindedirler. Yöntem, temelde ‘buhar fazından’ ve basıncı istenilen değerlere ayarlanmış bir ortamda ‘kimyasal reaksiyonlarla’ katı yüzey kaplama malzemesi üretilmesine dayanmaktadır. CVD işlemi,

karmaşık süreçler içerir. Çevreye zararlı zehirli ve koroziv gazlar oluşur. Nispeten daha limitli altlıklar için uygundur. CVD işlemi yaklaşık olarak 1000 °C gibi yüksek işlem sıcaklığına sahiptir. Yüksek işlem sıcaklığı yüzünden taban malzemelerde ısıtma işlemi gerektirir ve yüksek sıcaklık nedeniyle temperleme sıcaklığı aşıldığından dolayı takım çeliklerinde kullanılamaz. Ancak yüksek sıcaklıktan dolayı çelik matrisi ve yüzey kaplaması arasında oldukça iyi bir difüzyon gerçekleşir. Böylece taban malzeme ve kaplama tabakası arasında mükemmel bir bağlanma sağlanır. CVD kaplama tekniği; kesici, delici ve aşındırıcı yüzey üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. CVD kaplama işlemi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Şekil 22’de genel olarak CVD kaplama yöntemleri verilmektedir. Bütün yöntemlerde kaplama oluşturma mantığı temelde aynıdır [41].”



Şekil 22. CVD kaplama yöntemlerinin genel sınıfları [41].

3.1.2.2. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Yöntemi

PVD kaplama olarak bilinen ‘Fiziksel Buhar Biriktirme’ yöntemleri, temel olarak katı haldeki kaplama malzemesinin (hedef malzeme) buharlaştırılarak veya bu hedef malzemenin nispeten ağır atomlarla bombardıman işlemine tabi tutulmasıyla kaplama malzemesinden atom ya da atom grupları sıçratılarak bir taban malzeme üzerinde biriktirilmesi esasına dayanır. Bu kaplama işlemi geleneksel yöntemlerle olmayıp kaplama malzemesinin buharlaştırılıp, kaplama yapılacak malzeme yüzeyine yoğunlaştırılması ile

elde edilir. Bu yöntem uygulanırken dış atmosferden izole bir ortama ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle uygulama kapalı bir sistemde yapılır. Bu kapalı sistemde yüksek sıcaklık ve vakum vardır. Vakum uygulanmasının nedeni, buharlaştırılacak metalin, buharlaşma sıcaklığının düşürülmesidir [39]. Böylelikle daha düşük sıcaklıklarda buharlaşma işlemi gerçekleştirilir. Genellikle, mekanik, elektronik ve kimyasal uygulamalarda kullanılmaktadır [38, 39, 40].

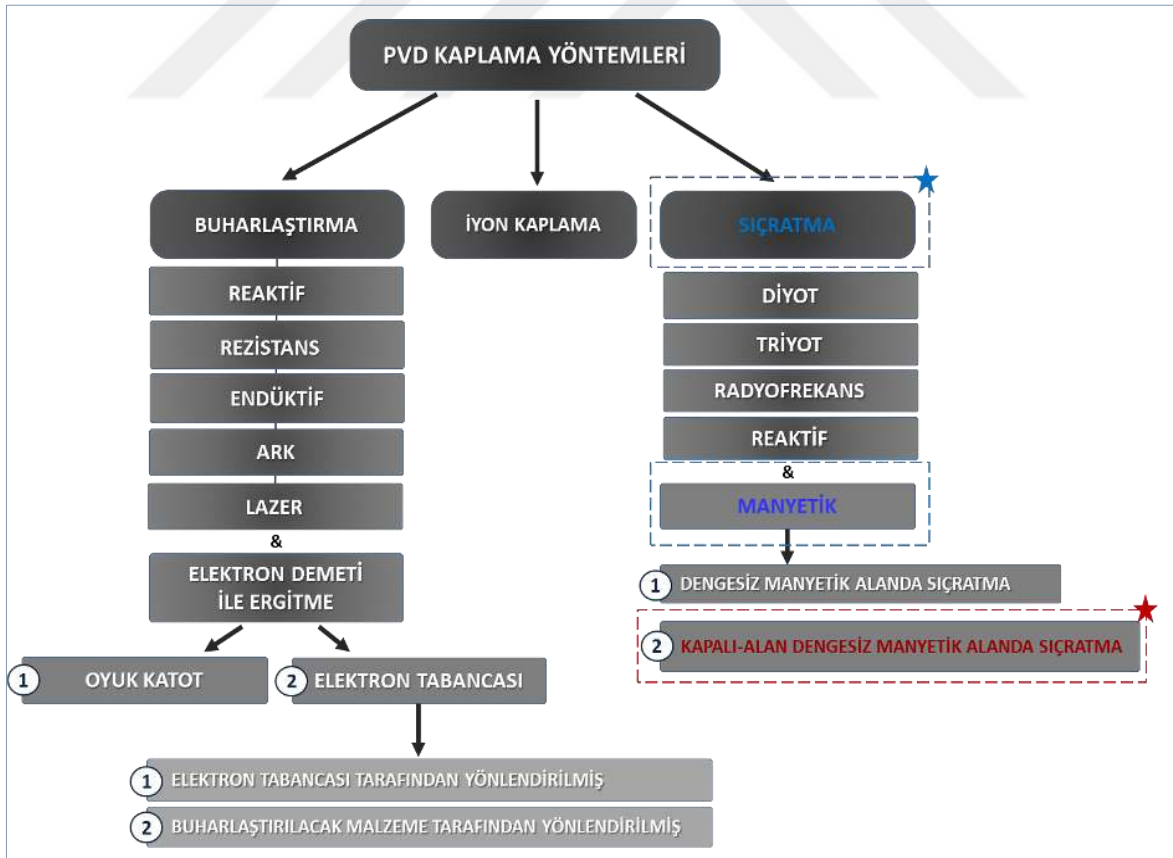
PVD kaplamanın amacı temel olarak abrazyon ve korozyon aşınmayı azaltmaktır. PVD kaplama tekniği ile elde edilen sert kaplamalar, kaplandığı malzemelerde gelişmiş tribolojik özelliklere sahip yüzeylerin oluşturulması amacıyla uygulanmaktadır. Bu şekilde yüksek mukavemet değerine, düşük sürtünme katsayısına ve yüksek aşınma dayanımına sahip özelliklerde malzeme yüzeyleri elde edilmektedir. PVD kaplama tekniği ile uygulanan ince sert kaplamaların uygun yüzey filmi malzemesi seçimi sayesinde aynı zamanda korozyon direncinin artırılması sağlanmaktadır. PVD yöntemi ile uygulanan kaplamalarla dövme ya da ekstrüzyon kalıplarının ve kesici takımların tribolojik özelliklerinin iyileştirilerek kullanım ömürlerinin uzatılması amaçlanmaktadır. PVD kaplamaların uygulanmasıyla servis ömrünün geleneksel nitrasyonlu kalıplara göre belirgin bir şekilde uzadığı görülmektedir [33, 36, 43].

Ekstrüzyon veya dövme ile üretim yöntemlerinde kullanılan kalıpların aşınmasını azaltmak için çift katmanlı kaplamalar düşünülmektedir. Çift katmanlı kaplamalarda altlık malzemesi plazma nitrasyon işleminden sonra PVD yöntemi kullanılarak kaplanmaktadır. Nitrasyon tabakası bu sırada kaplamaya destek olarak, kaplamanın taşıyabileceği yük miktarını artırmaktadır [33, 44, 45]. Üç ve daha fazla bileşen malzemenin çeşitli stokiyometrilere biriktirilmesine imkân verdiğinden dolayı, PVD işlemi, çok esnek olduğunu ispatlamıştır [30]. Bununla birlikte PVD kaplama yönteminin malzeme yüzeylerine özellikle tribolojik olarak kazandırdığı birçok avantaj olmaktadır. PVD kaplamaların önemli avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [46, 47, 48];

- En basit kaplama yöntemlerinden olması,
- Tekli, çoklu ve kademeli tabakalar halinde biriktirilebilir olması,
- Neredeyse her kaplama türünün her taban malzemesi üzerine biriktirilebilir olması,
- Kompleks geometrilere sahip parçaların homojen olarak kaplanabilmesi,
- Keskin köşelere sahip elemanlara nispeten daha etkin uygulanabilirliği,
- Mükemmel yapışma özelliğine sahip olmaları,

- Yüksek sertlik ve yüksek aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısına sahip olması,
- Nispeten düşük işlem sıcaklığı gerektirmesi,
- Düşük ısıl iletkenlik sayesinde takım ısınmasının düşük olmasının sağlanması,
- İşlenen parçaların takım-kalıp yüzeyine yapışmasının engellenmesi,
- Mikron düzeyinde kaplama kalınlığı sebebiyle ölçü değişiminin olmaması,
- Kaplama sonrası yüzey pürüzlülüğü, taban malzemenin yüzey pürüzlülüğüyle yaklaşık aynı olmasından dolayı kaplama sonrasında yüzey işlemi gerekmemesi,
- Biriktirme hız aralığı oldukça geniş olması ve yüksek hızda üretim yapılabilmesi,
- Sökülerek tekrar kaplama yapılabilmesi imkânı sağlaması.

PVD kaplama tekniğinin farklı uygulama yöntemleri geliştirilmiştir. PVD kaplama tekniğinin uygulama yöntemleri Şekil 23'te sınıflandırılmış olarak verilmektedir. PVD kaplama yöntemleri genel olarak buharlaştırma, iyon kaplama ve sıçratma olarak 3 gruba ayrılır.



Şekil 23. PVD kaplama yöntemleri [49, 50].

3.1.2.2.1. Buharlaştırma Yöntemi

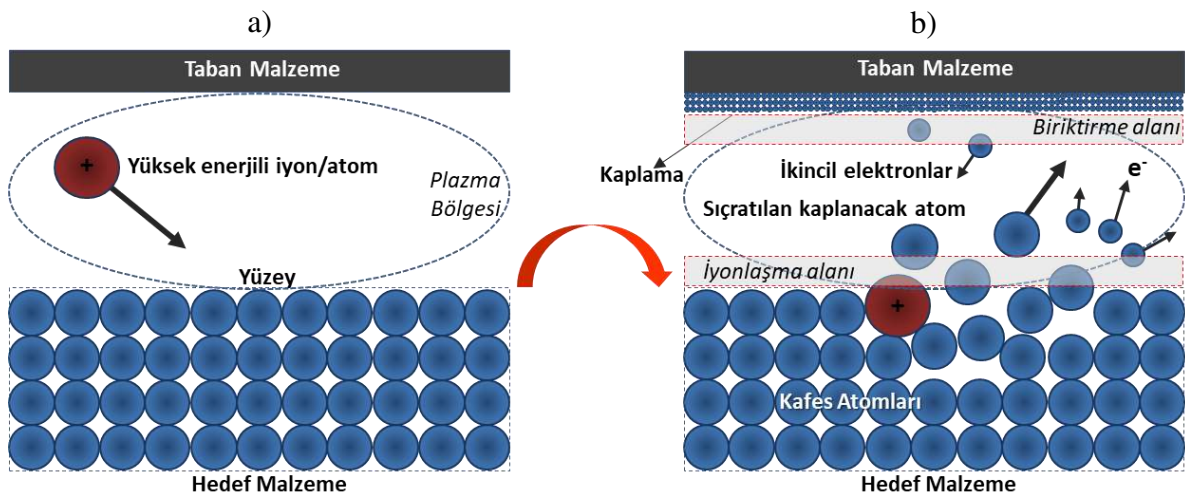
Buharlaştırma yöntemi en eski vakum biriktirme yöntemlerinden biri olmakla birlikte en sık kullanılan yöntemlerdendir. Buharlaştırma, malzemenin termal bir ısı kaynağı kullanılarak buhar haline getirilip kaynak yüzeyinden koparılması prensibine dayanır. Buharlaştırma işlemi, hedef malzemenin ısıtılarak buharlaştırılması ve buharlaşarak hedef malzeme yüzeyinden kopan parçacıkların altlık malzeme yüzeylerine doğrusal bir yol izlemesiyle ulaşarak birikmesi esasına dayanmaktadır. Buharlaştırılacak kaynak malzemeleri; toz, tel veya çubuk şeklinde olabilmektedir. Yöntemde hedef malzemelerin buharlaştırma işlemi çeşitli yöntemlerle ısıtılıp buhar fazı oluşturulabilmektedir. Buharlaştırma yöntemi genel olarak reaktif buharlaştırma, rezistanslı buharlaştırma, endüktif buharlaştırma, elektrik arkı ile buharlaştırma, lazerli buharlaştırma ve elektron demeti ile ertirerek buharlaştırma metodu olarak sınıflandırılmaktadır [38].

Reaktif buharlaştırma yönteminde buharlaştırma reaktif işlemlerle sağlanır. Rezistans ile buharlaştırma yönteminde, oksidasyona ve sıcaklığa karşı direnci yüksek pota içerisine buharlaştırılacak kaplama malzemesi yerleştirilir ve pota etrafına sarılmış rezistans teller yardımıyla ısıtma işlemi gerçekleştirilerek buharlaştırma sağlanır. Rezistansla buharlaştırma yönteminde iyonlaşma işleminin çok az olması sebebiyle kaplamanın yüzeye bağlanabilirliği düşük ve gözenekliliği ise yüksek olur. Elde edilen kaplamalar çoğunlukla dekoratif amaçlı ve optik amaçlı uygulamalar için kullanılmaktadır. Endüktif ile yapılan ısıtılarda buharlaştırma pota etrafına su soğutmalı olarak sarılmış bakır tellere uygulanan indüksiyon akımı sonucunda üretilen ısı neticesinde meydana gelmektedir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı ekonomik açıdan maliyetinin yüksek olmasıdır. Elektrik ark yönteminde hedef malzemenin buharlaştırılması ve iyonize olması amacıyla ark kullanılmaktadır. Katodik ark vakum odasına, buharlaştırılacak olan hedef malzeme katot olarak, kaplanacak olan altlık malzemesi ise anot olarak yerleştirilir. Elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi, bir elektron kaynağı vasıtası ile sağlanan yüksek enerjili elektronların, hedef malzemeye yönlendirilmesi sonucunda açığa çıkan enerjinin malzemeyi buharlaştırması prensibine dayanmaktadır. Yöntem, bir elektron kaynağı tarafından sağlanan elektronların, kaplama malzemesi üzerine bombardıman edilmesi yardımıyla buharlaşmanın sağlanması sayesinde uygulanmaktadır. Bir diğer buharlaştırma yöntemi olan lazer ile buharlaştırma yönteminde ise kaplanacak hedef malzeme vakum odasından lazer kaynağı kullanılarak buharlaştırılır ve taban malzeme üzerine biriktirilir [7, 15, 27, 28, 47].

Buharlaştırma işleminin vakum ortamında gerçekleştirilmesi dolayısıyla hedef malzemenin buharlaşan atomlar birbirleri ile çarpışmadan doğrusal olarak ilerleyip altlık malzeme yüzeyine ulaşır. Buharlaştırma yöntemi temelde ergime ve katılaşma (yoğunlaşma) süreçlerinden oluşmaktadır. Birçok malzeme hemen hemen her taban malzemesi üzerine uygun bir teknik kullanılarak kaplanabilir. Buharlaştırma tekniği, buhar fazına geçen hedef malzemesi atomlarının düşük kinetik enerjileri nedeniyle, genelde düşük kaplama yapışma dayanımıyla sonuçlanır. Ayrıca, yüksek taban malzemesi sıcaklıkları, ince taban malzemelerinin çarpılmasına neden olabilir ve metalik taban malzemelerinin ısıl işlemini değişikliğe uğratabilir. Öte yandan her hedef malzemenin buharlaştırma sıcaklık değeri aynı değildir. Bu nedenle kaplama işlemi uygulamasında kullanılan farklı hedef malzemelerin buharlaşma verimleri aynı olmayacağından kaplama tabakasından beklenen özelliğin karşılanması mümkün olmayabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı diğer vakum biriktirme tekniklerine göre tribolojik amaçlarla daha az tercih edilir. Fakat düşük maliyet ve basit uygulama olanaklarına sahip oluşu ve yüksek biriktirme hızlarının elde edilebilmesi, tekniği yine de birçok uygulama için ilgi çekici hale getirmektedir [28, 38, 48].

3.1.2.2.2. Sıçratma Yöntemi

Bu yönteme "*kopartma kaynaklı kaplama*" ya da "*sputtering yöntemi*" de denilebilir. Kopartma (sputtering); enerjik parçacıklar ile hedef olarak kullanılan bir malzeme yüzeyinin bombardıman edilerek yüzeyinden atomlarının ya da moleküllerinin koparılması işlemine denilmektedir. Sıçratma yöntemi şematik olarak Şekil 24'te açıklanmaktadır.



Şekil 24. Sıçratma tekniğinin şematik gösterimi; a) Bombardıman, b) Kopartma [27, 28].

Sıçratma tekniği, genel olarak momentum transferi prensibi ile gerçekleştirilmektedir. Sıçratma tekniğinde, bir hedef malzemeden buhar fazı elde edilmektedir. Hedef malzeme pozitif iyon bombardımanına tutularak yüzeyinden atom veya atom grupları kopartılmaktadır. Etkili bir kopartma işlemi gerçekleştirebilmek için gerekli olan şart, parçacıkların atomik boyutlarda olmalarıdır. Kopartma işlemi için genellikle asal gazlar kullanılır. Ayrıca asal gazların kimyasal olarak aktif olmayıp, herhangi bir kimyasal tepkimeye girmemeleri sıçratma yönteminde kullanılmaları için tercih sebebidir. Bu işlem için genelde Argon gazı iyon olarak kullanılmaktadır. Sıçratma yönteminde kullanılan bu soy gaz iyonları, hedef malzeme yüzeyine çarparak sahip oldukları enerjiyi malzemeye verirler ve böylece malzeme yüzeyinden atomları sıçratırlar. Sıçratılan atom veya atom grupları oluşan plazma içerisinde buhar fazına geçmektedir. Kaplanacak malzemeler sıçratılmış atomların akışını kesecek bir şekilde yerleştirildiğinden bu atom veya atom grupları taban malzemesi yüzeyinde birikmektedir. [28, 51, 52].

Belli bir enerjiye sahip parçacıklar katı bir madde yüzeyine çarptıklarında, çarpan parçacıklardan hedef malzemeye momentum aktarırlar. Söz konusu bu momentum aktarımı, çarpan parçacıkların enerjileri ile ilişkilidir ve enerji nedeniyle hedef malzeme yüzeyinde bağlar kopar, atomsal dislokasyonlar oluşur ve uygun enerjilerde hedef malzeme yüzeyinden atomlar kopar. Sıçratma işlemi, sıçratma gazı olarak kullanılan Ar^+ iyonlarının negatif yüklü hedefe çarpması ve hedef malzemenin atomlarını koparması ile sağlanır. Sıçratma olarak tanımlanan bu olay, kopan atomların gaz fazında çarpışmalarının mümkün olduğunca az olacağı düşük basınç koşullarında gerçekleştirilebilir. Sonuç olarak özel bir sistemle hedef malzemelerden sıçratılan atomların altlık malzemesine biriktirilmesi işlemi esasına göre yapılan bir kaplama yöntemidir [27, 48].

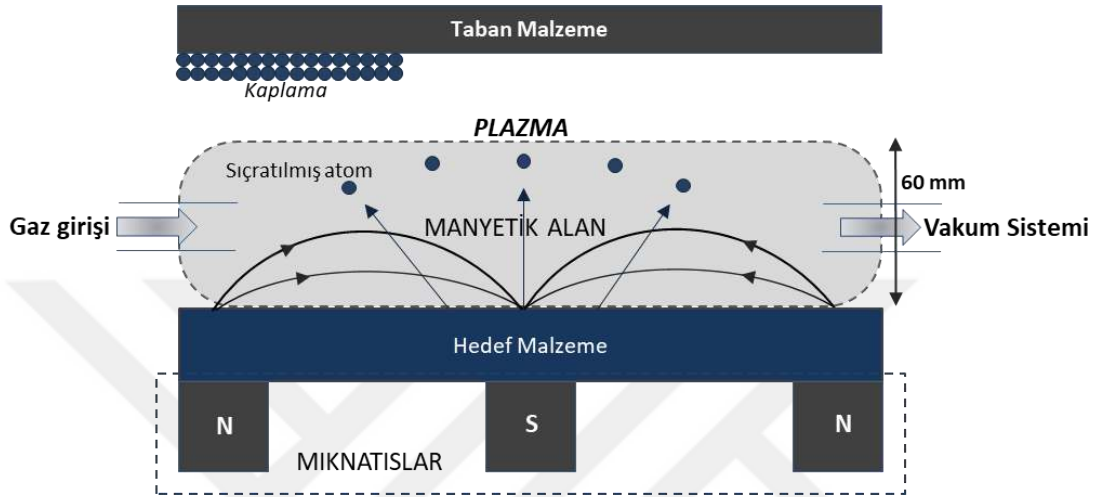
Sıçratma tekniği, kaplamaların kalitesi ve yapısı oldukça iyi olması, üniform kaplama kalitesi elde edilebilmesi, kaplama tabakalarının adezyonlarının iyi olmasıyla başarılı bir kaplama yöntemi olmakla beraber düşük biriktirme hızı ve düşük iyonlaşma etkisi kullanımlarını sınırlamaktadır. Limitli kaplama kalınlığı ve yüksek maliyetleri dolayısıyla dezavantaja sahip bir tekniktir. Diyot sıçratma, triyot sıçratma, iyon demeti ile sıçratma, radyofrekans ile sıçratma, reaktif sıçratma ve manyetik alanda sıçratma yöntemleri bulunmaktadır [47, 48, 52]. Manyetik alanda sıçratma yöntemi dâhilinde özellikle kapalı alan dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemi sağladığı avantajlar dolayısıyla son zamanlarda üzerinde durulan ve bilimsel çalışmaların odağında olan bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır [27, 28].

3.1.2.2.2.1. Manyetik Alanda Sıçratma Tekniği

Sıçratma yöntemleri arasında manyetik sıçratma yöntemlerinde sağlanan gelişmeler ve avantajları göz önünde bulundurulduğunda en yaygın şekilde kullanılan kaplama yöntemleri arasındadır. Şekil 25 manyetik alanda sıçratma yöntemini göstermektedir. Manyetik alanda sıçratma yönteminde, sıçratma işleminin oluşturulan plazma içerisinde meydana getirilen manyetik alanda gerçekleştirilmesiyle, kaplama işleminde olumlu yönde gelişmeler elde edilebilmektedir. Hedefin merkez eksenini, mıknatısın bir kutbunu oluşturur. İkinci kutbu ise, hedefin kenarlarına yerleştirilen mıknatıslar tarafından halka şeklinde oluşturulur. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi, elektrik ve manyetik alanların hedef üzerinde birbirine dik olmasını sağlar. Manyetik alanda kaplama işleminde, katot yüzeyinde paralel olarak uygulanan manyetik alan elektron tuzakları oluşturmaktadır ve katoda yaklaşan elektron hareketlerini kısıtlamaktadır. Manyetik alan çizgisinde yakalanan elektronlar manyetik alan sebebiyle anoda yönelerek altlığa doğru ilerlemektedir. Sıçratma yönteminde, yüksek enerjili atomlar altlık yüzeyine ulaşır ulaşmaz enerjilerini kaybederler. Tek tek atomlardan ya da atom kümelerinden sentezlenen kaplama tabakaları altlık yüzeyinde birikerek büyürler. Bu iyonlaşma mekanizması yüksek verimi sebebiyle düşük voltaj ve yüksek akım yoğunluğunda çalıştırılabilmektedir. Sonuç olarak altlık malzeme yüzeyinde geleneksel sıçratma yöntemine oranla daha yüksek yoğunluklu biriktirme hızı elde edilebilmektedir [27, 48]. Manyetik alanda sıçratma yönteminde, atomların yüksek bir enerji düzeyine ulaşmaları, hedef malzemelerin yüksek seviyelerde ısıtılmasına gerek olmaması, sıçratma verimliliklerinin nispeten daha yüksek olması ve ultra ince kaplama tabakalarının geliştirilebilmesi gibi avantajları dolayısıyla uygulamalarda tercih edilen bir sert kaplama yöntemi olmaktadır. Manyetik alanda sıçratma metodu aynı zamanda sıçratma yöntemleri içerisinde düşük çalışma basınçlarında kullanımlarından dolayı oldukça umut vaat edici bir tekniktir [27, 48].

Manyetik alanı oluşturan mıknatıslar katoda paralel yerleştirilmiştir ve elektronlar parlama boşalmasında elektriksel alandan manyetik alana doğru sürüklenirler. Manyetik alanın uygun bir şekilde ayarlanmasıyla, sürüklenen ikincil elektronların yakın bir döngüsü oluşturulur. Bu elektron yakalama etkisi, elektronlar ve sıçratılan gazlar arasındaki çarpışma oranını artırır. Manyetik alanda sıçratma yönteminde sıçratılan partiküller deşarj boşluğunda belirli bir düzen içerisinde birbirlerine çarpışmadan yol alarak taban malzeme yüzeyinde yüksek biriktirme oranlarının elde edilmesini sağlar [9, 27].

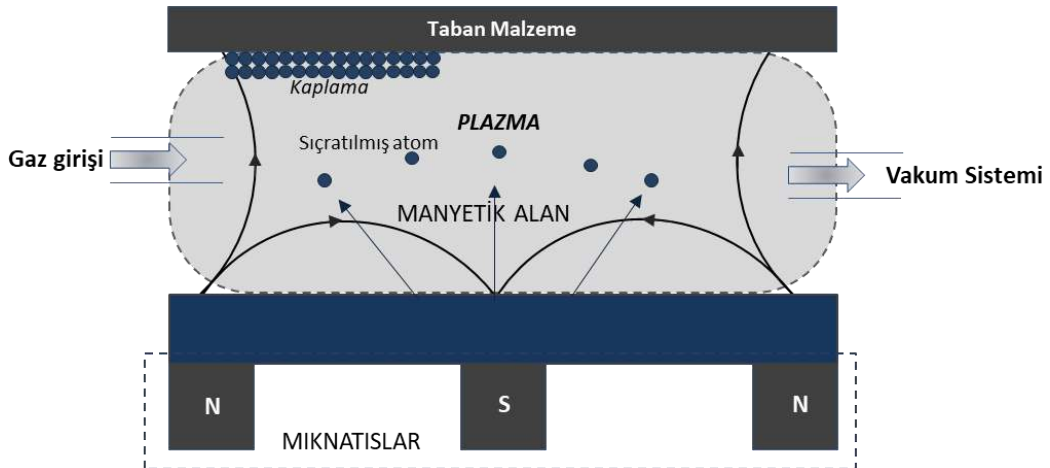
Sistemde altlık malzemeye gönderilen iyonların kontrolü ve akımının veya enerji seviyelerinin yüksekliği sayesinde bu yöntemle çok yönlü kaplamalar yapılabilir. Kaplama parametrelerinin kontrolü oldukça geniş bir aralıkta sağlanabildiğinden bu yöntemle oldukça yüksek yüzey kalitelisinde kaplama tabakaları biriktirilebilmektedir [9].



Şekil 25. Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi [9, 27].

3.1.2.2.1.1. Dengesiz Manyetik Alanda Sıçratma Tekniği

Dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniği şematik olarak Şekil 26'da gösterilmektedir. Dengesiz manyetik alanda sıçratma yöntemi Geleneksel manyetik alan yöntemindeki manyetik alanın değiştirilmesine dayalı olan bir tekniktir.

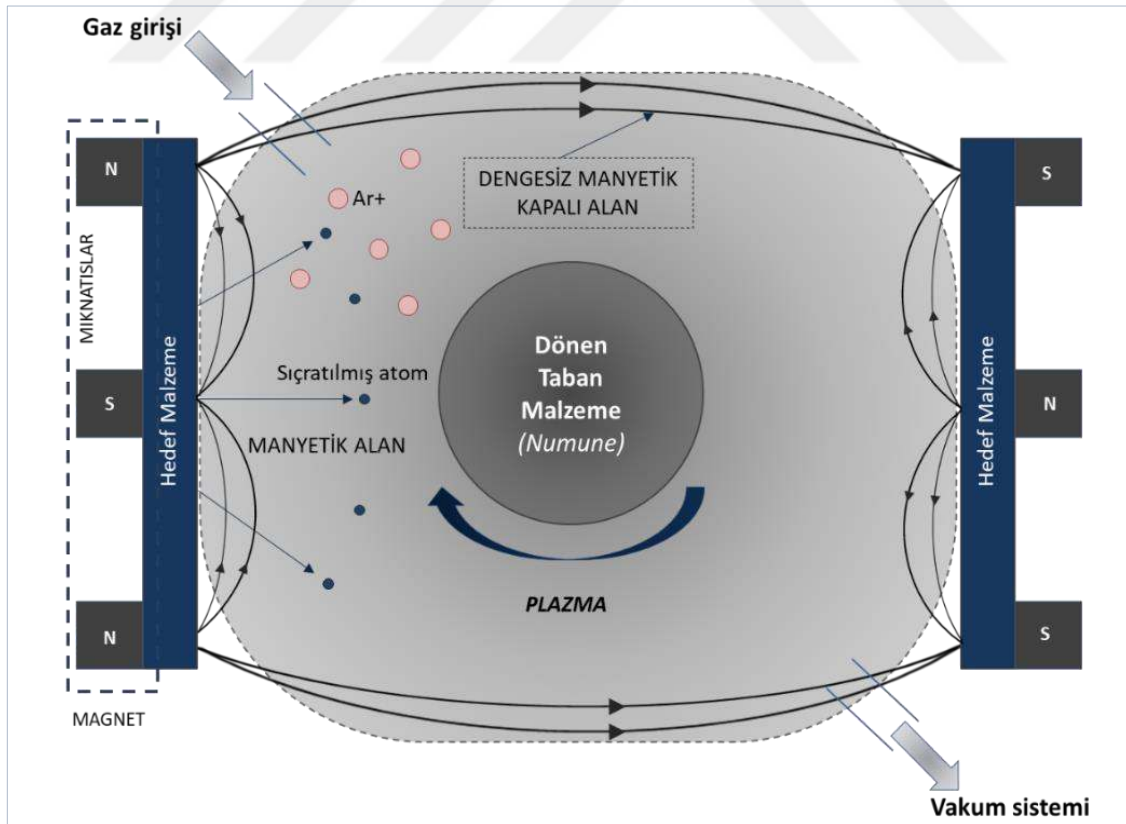


Şekil 26. Dengesiz manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi [9, 27].

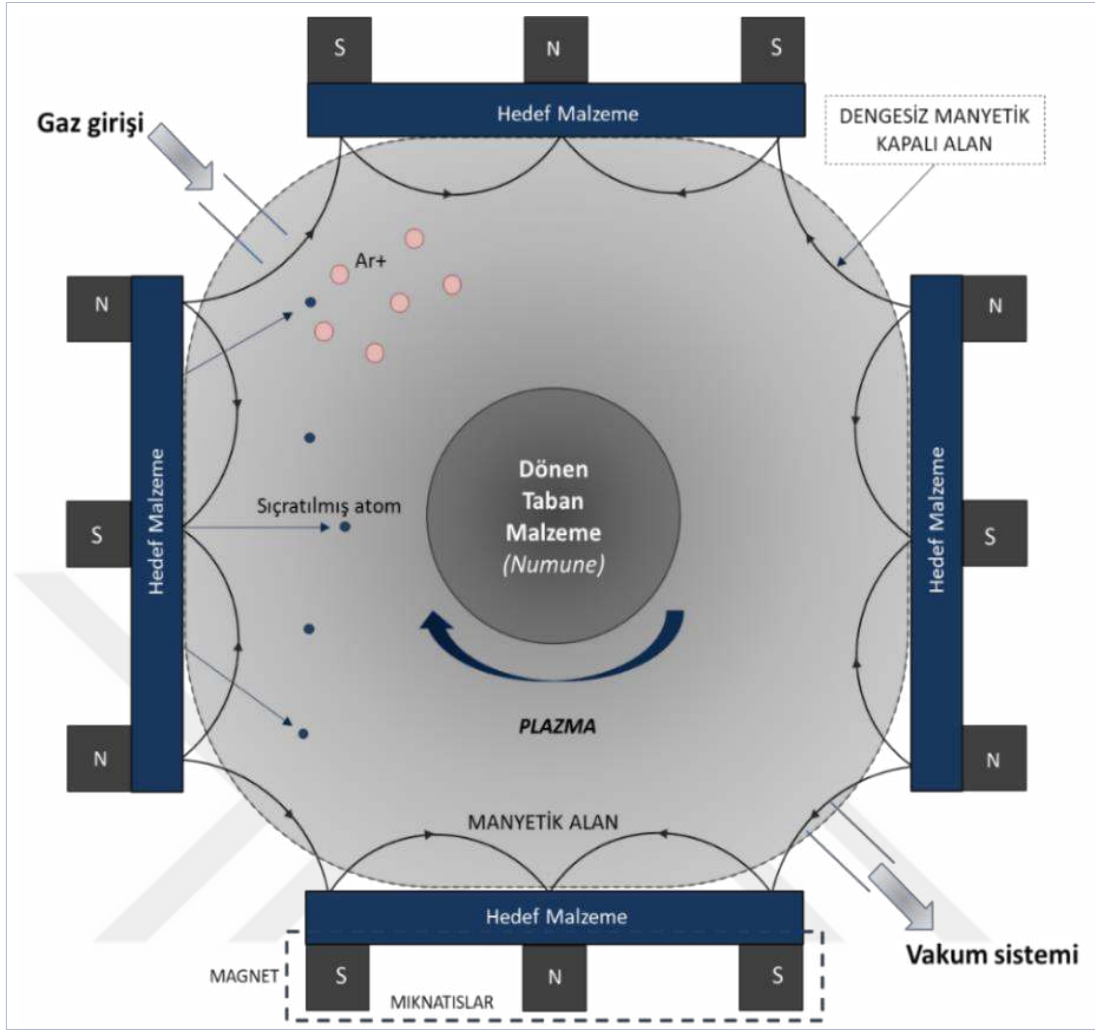
Dengesiz manyetik alanda sıçratma yönteminde; plazmanın manyetik alan çizgilerini takip ederek altlık malzemeye yayılması dış kısımdaki mıknatısların, merkezde yer alan mıknatıstan daha kuvvetli seçilmesiyle sağlanır. Bu sayede manyetik alanın dengesi bozularak altlık malzeme ile hedef malzemesi arasında manyetik alan vasıtasıyla plazma kapanır. Hedef malzemeden sıçratılan elektronların büyük bir kısmı manyetik alan çizgileri boyunca altlık malzeme üzerine gider. Artı yüklü iyonlar da elektrostatik çekim kuvvetinin sonucunda elektronları takip ederler. Manyetik alanda sıçratmada iyon bombardımanını artırabilmek için manyetik alan sayısını artıran sistemler geliştirilmiştir [9, 27].

3.1.2.2.1.1.1. Dengesiz Kapalı-Alan Manyetik Alanda Sıçratma Tekniği

Kapalı-alan dengesiz manyetik alanda sıçratma tekniğinde, Şekil 27 ve Şekil 28’de görüldüğü gibi manyetik alan sayısı daha fazladır. İlk şekilde çift kapalı manyetik alan modelinin, ikinci şekilde dörtlü kapalı manyetik alanda sıçratma yöntemlerinin şematik gösterimleri verilmektedir.



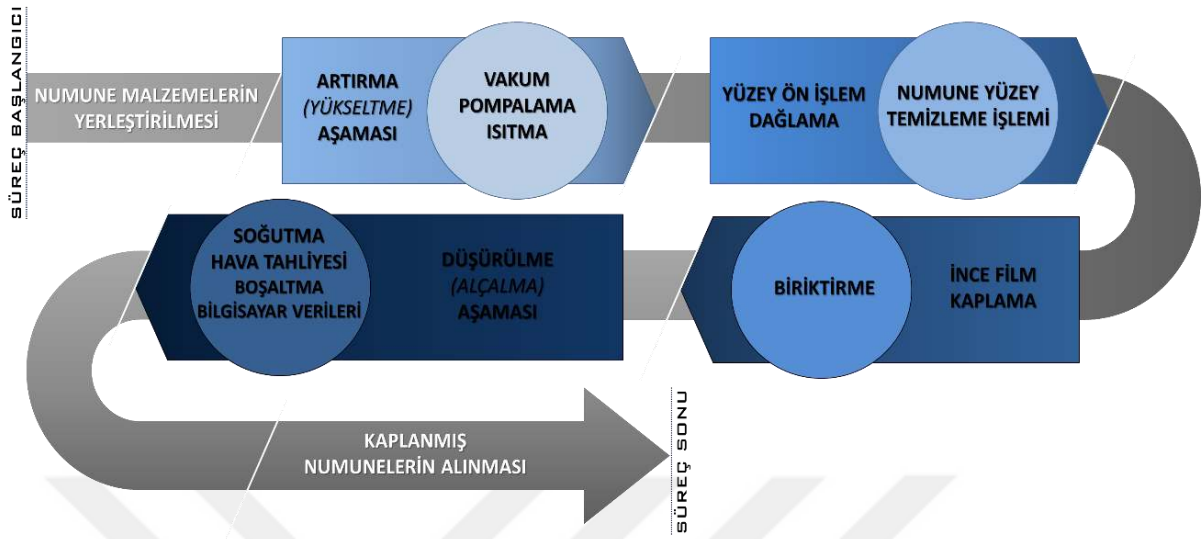
Şekil 27. Kapalı-alan dengesiz çift manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi [9, 27].



Şekil 28. Kapalı-alan dengesiz dörtlü manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik gösterimi [9, 27].

Kapalı alan sistemlerde, manyetik alan çizgileri birbirleriyle bağlanmaktadır ve manyetik etkiyle oluşturulan bu kapalı alan, ikincil elektronlar için kapalı bir tuzak oluşturmaktadırlar. Zıt kutupların birbirine karşılıklı yerleştirilerek kapalı alanın elde edildiği bu sistemde iki tane dengesiz manyetik alan birbirine ters konumlandırılarak çiftli manyetik kapalı alan meydana getirilir. Böylece manyetik alan çizgileri kapalı bir alan oluşturarak plazmadaki elektronların oluşturulan kapalı manyetik alan hattı dışına çıkmasına mani olur. Bu sistemde elektronların oluşan manyetik alan dışına çıkma olasılığı çok düşüktür. Bunun sonucunda altlık malzeme bölgesinde diğer sistemlere kıyasla daha yoğun bir plazma elde edilir ve böylelikle de iyon bombardımanı etkisi artar [9, 27]. Dengesiz kapalı-alan manyetik alanda sıçratma tekniklerinden özellikle Şekil 28’de gösterilen yöntem sağladığı avantajlar sayesinde tercih edilen bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır.

3.1.2.2.2. PVD Yöntemiyle Sıçratma Tekniği Sürecinin Aşamaları



Şekil 29. PVD sıçratma yöntemi ile kaplama işleminin akış şeması [53].

Kaplama için belirli boyutlarda kesilen numuneler, kaplama uygulanacak yüzeylerinin istenilen yüzey pürüzlülük değerine kadar zımparalanıp parlatılma işlemlerinden sonra kaplama işlemi uygulanmadan önce bir ön hazırlık aşamasından geçirirler. Bu ön hazırlık aşaması kaplama tabakasının kalitesi bakımından oldukça önemli işlemlerdir. Bu anlamda öncelikle numuneler detaylı bir şekilde temizlenir. Bunun için numuneler kaplama uygulamasının gerçekleştirileceği sistemde vakum odasına yerleştirilmeden önce ultrasonik bir banyoda temizlenirler. Ultrasonik temizleme sonrası numuneler dağlama işlemine tabi tutulurlar. Bu süreç tamamlandıktan sonra numuneler kaplama uygulanacak sistemde vakum odasında tutuculara yerleştirilirler ve kaplama işlemi Şekil 29'daki dört önemli aşamada gerçekleştirilir.

Bu aşamalar aşağıdaki gibidir [53]:

I. Aşama: Sürecin artırılma ve yükseltme aşaması olarak adlandırılır. Bu adımda vakum odasında kademeli bir sıcaklık artışı başlatılır ve basınç düşürme işlemi için vakum pompaları devreye girer.

II. Aşama: Katodik temizleme aşaması olarak adlandırılır. Numune yüzeylerinde bulunan kirlilikleri temizlemek amacıyla vakum odasında plazma sayesinde numuneler iyon bombardımanına tutulur. Bu işlem biriktirme için oldukça önemlidir, çünkü böylece kaplama işleminde daha iyi bir yapışma kalitesi sağlanır.

III. Aşama: Kaplamanın gerçekleştirildiği adımdır. Biriktirilecek malzemenin veya malzemelerin numune yüzeyine kaplama biriktirmesi yapması sağlanır.

IV. Aşama: Sürecin alçalma ve düşürülme aşaması olarak adlandırılır. Bu adımda vakum odasının oda sıcaklığına ve ortam basıncına getirilmesi sağlanır. Bu aşama için iki soğutma sistemi kullanılır. Bunlardan biri vakum pompaları için diğeri de soğutma hedefleri içindir. Ekipmanın basınç boşaltma işlemi ve soğutulma sürecinin uygun olarak yapılması, kaplama kalitelerine zarar verilmemesi için oldukça önem taşımaktadır.

Kaplama işlemi uygulanan sistemdeki bu dört aşama tamamlandıktan sonra ve vakum odası basıncı ile sıcaklık istenilen seviyelere geldiğinde numuneler tutuculardan sökülerek alınır. Kaplanan numuneler dış etkenlerin zararlarından etkilenmemeleri için derhal özel paketlere yerleştirilerek muhafaza edilir.

3.1.2.2.3. Sıçratma Yöntemindeki Kaplama Hedef Malzemeleri

Sert ince kaplama tekniklerinden sıçratma yöntemlerinde taban malzemelerin yüzeylerine kaplama tabakası oluşturulması için kaplama tabakasında olması istenen malzeme elementlerinden oluşan disk veya plakalara hedef malzeme denilmektedir. Üretim uygulamalarında kare veya dikdörtgen şekilli hedef malzemeler kullanılmaktadır. Hedef malzemelerin özellikleri kaplama koşullarının yanı sıra kaplama özelliklerini etkileyen temel etmendir. Hedef malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri bileşik, saf veya toz halde olabilmektedir. Bileşik haldeki hedeflerin bileşimi kaplama tabakasında oluşacak bileşim ile tutarlı olmalıdır. Sıçratma yönteminde oldukça geniş türde malzemeler kullanılmaktadır. Bileşik haldeki hedeflerin yanı sıra metal oksitler, nitrürler, karbürler gibi doğrudan sinterlenmiş toz hedefler de sıçratma yöntemlerinde hedef malzeme olarak kullanılmaktadır. Toz haldeki hedef malzemeler sıçratma verimlerinin düşük olmasından dolayı dezavantaja sahiptir [7, 28].

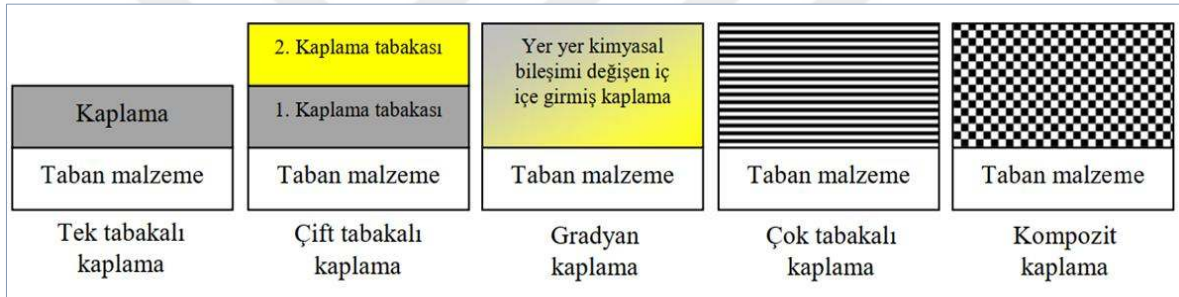
3.2. Sert Kaplamalar

Makine elemanlarının, talaşlı işleme takımlarının ve dövme kalıplarının aşınma dayanımlarının iyileştirilerek ömürlerinin uzatılması amacı ile son zamanlarda özellikle yüzey kaplamada TiN (Titanyum-Nitrür) esaslı sert kaplamalar ön plana çıkmaktadır. Sert kaplamalar tribolojik olarak çok yönlü karakteristik özellikler sağlayan kaplamalardır.

Geçmişten günümüze kadar pek çok ikili (TiN, AlN, ZrN vb.) ve üçlü (TiAlN, TiZrN vb.) olarak tek tabakalı ve çok tabakalı sert kaplama uygulamaları geliştirilmiştir. Geçiş metalleri ile azotun iyonik ve kovalent karakterde bağlanması ile oluşan sert kaplamalar genellikle aşınmaya dirençli ve yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik bileşiklerdir.

3.3. Sert Kaplama Yapıları ve Çeşitleri

Endüstriyel uygulama şartlarına bağlı olarak istenen amaca göre Şekil 30'da görüldüğü gibi beş farklı yapıda kaplama üretilmekte ve bu sayede farklı mekanik özellikler elde edilmektedir. Tek tabakalı, çift tabakalı ve çok tabakalı veya gradyan ve kompozit kaplama yapıları sert kaplamaların uygulama yapıları olarak belirlenmektedir [54].



Şekil 30. Sert kaplama tabakası yapıları [55].

Şekilde verilen kaplama yapıları sert kaplamalarda yapılan araştırmalar ve elde edilen geliştirmeler sayesinde şekillenmiştir. Bu anlamda PVD tekniğinin kullanılmasıyla başarılı olan ilk sert kaplama TiN kaplamadır. Çok geçmeden, diğer elementlerin TiN'e eklenmesinin, bu kaplamanın mekanik ve oksidasyon özelliklerini iyileştirdiğinin farkına varılmıştır. TiN kaplama bileşimine Alüminyum elementi ilavesi ile oluşturulan TiAlN kaplama bileşimiyle kaplanan malzemelerin tribolojik özelliklerinde çok başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu kaplama, keşfinden sonra yüksek sıcaklıklardaki kesme uygulamalarında TiN ile yer değiştirmiştir ve bugün hala en yaygın kullanılan sert kaplamalardandır. Sonraki gelişmeler ile TiN kaplama bileşimine Zr gibi farklı element katkıları yapılarak oluşturulan kaplama bileşimleri sayesinde kaplamaların farklı tribolojik özelliklerinde iyileştirmeler sağlanmıştır. Aynı zamanda, oluşturulan farklı kaplama bileşenleri farklı kaplama yapıları ile yüzeylere uygulanarak kaplama performansları geliştirilmiştir. TiN esaslı kaplama

bileşimine çeşitli geçiş elementleri katkıları ve farklı kaplama yapılarının uygulanması ile kaplama performanslarının araştırma ve geliştirme çalışmaları sürdürülmektedir [28, 56].

Endüstride imalat alanında özellikle kesici takımların ve ekstrüzyon ya da dövme kalıplarının tribolojik karakteristiklerinin iyileştirmesi yönündeki artan taleplerin karşılanması amacıyla farklı üstün özelliklere sahip çok bileşenli farklı kaplamalar birleştirilerek daha üstün özelliklere sahip çok katmanlı kaplamalar geliştirilmesi üzerine bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Bunun için birleştirilerek çok katmanlı tabaka oluşturulacak kaplama bileşimleri, oluşturulacak kaplama tabakasından beklenen üstünlüklerin sağlanmasını gerçekleştirecek özellikleri dikkate alınarak seçilir ve çok katmanlı tabakanın özellikleri kullanım alanının ve şartlarının gereklilikleri doğrultusunda iyileştirilmiş olur.

Uygun malzeme kombinasyonları oluşturularak farklı bileşenli katmanlara sahip çok sayılı nano-tabakalı kaplamaların biriktirilmesiyle, sert kaplamaların aşınma, korozyon ve oksidasyon direncinde artış sağlanmıştır. Çok tabakalı kaplamaların esas olarak amacı, farklı kaplamaların pozitif karakteristiklerini birleştirerek üstün özelliklere sahip yeni kaplama tabakaları geliştirmektir. Birçok kaplamada, istenilen tüm yüzey özelliklerini tek bir yüzey işlemiyle elde etme imkânı sınırlıdır. Bu açıdan bakıldığında, bugün iki veya daha fazla katmanlı kombine yüzey teknikleri daha umut verici uygulamalar olarak birçok endüstriyel alanda kullanılmaya başlanmıştır [28, 56].

3.3.1. Ti, Al ve Zr Katkılı Sert Kaplamalar

TiN esaslı sert kaplama tabakası bileşimine kaplama tabakasına farklı tribolojik özelliklerin kazandırılması ve daha üstün aşınma dayanımına sahip kaplama tabakası elde edilmesi amacıyla Al ve Zr elementleri ilave edilmektedir. Bu kaplamalar arasında temel kaplama bileşimleri olarak kullanılan TiN, AlN ve ZrN gibi tek fazlı kaplama bileşimleri ve TiAlN, AlTiN, TiZrN ve TiAlZrN gibi çok fazlı kaplama bileşimleri bulunmaktadır. Endüstride son yıllarda tek fazlı kaplamaların yanı sıra sert kaplamaların kimyasal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin daha da geliştirilmesi üzerinde durulmaktadır. Bu sebeple TiN, AlN ve ZrN gibi tek fazlı sert kaplamaların özelliklerini iyileştirmek için çok fazlı TiAlN, AlTiN ve TiZrN gibi sert kaplamalar geliştirilmiştir. Geliştirilen çok fazlı kaplama tabakaları endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanına sahip olmuştur.

3.3.1.1. TiN Kaplama

TiN kaplamanın genel özellikleri; ortalama sertlik değeri 2900 ± 200 HV, ortalama oksidasyon sıcaklığı 550 °C, ortalama sürtünme katsayısı 0,65, ortalama yüzey pürüzlülüğü $0,2$ μm , ortalama kaplama kalınlığı $2-3$ μm ve kaplama rengi altın sarısı şeklinde genellenebilir.

Sert kaplama yöntemlerinden bilinen en eski kaplama türü TiN kaplamadır. Titanyum esaslı sert ince filmler, yüksek ergime noktası, yüksek sertlik ve yüksek aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. TiN kaplamalar yüksek sertliği ve düşük ısı geçirgenliği sayesinde ısı transferini engeller, takımların ısınarak sertliğinin düşmesini önler ve serbest yüzey aşınmasını azaltır. Yapılan araştırmalar neticesinde ortaya konulmuştur ki, performans yönünden TiN kaplanan parçaların ömründe 3-30 kat arasında bir artış sağlamaktadır.

Bu özellikler, temelde TiN'in kesme ve şekillendirme takımları için en popüler kaplama olmasını sağlamıştır. Bunun yanında, yapılan deneysel çalışmalarda, TiN kaplamaların düşük sıcaklık ve düşük kayma hızlarında aşınma miktarının düşük olduğu, fakat 450 °C üzerindeki sıcaklıklarda aşınma direncinin azaldığı ve hızlı bir hasara uğradığı ortaya konulmuştur. Bu nedenle bu kaplamaların yüksek sıcaklıklarda aşınma direncini arttırmak için çeşitli elementler eklenerek oksitlenme direncinin artırılması hedeflenmiştir. Son yıllarda, nitrür esaslı seramik kaplamaların yüksek sertlik ve aşınma direnci, kimyasal kararlılık, iyi elektriksel iletkenlik gibi özelliklerinde, bu yapılara Al, Si, Cr, Zr, V, Mo vs. gibi elementler ilave edilmek suretiyle iyileştirilme yapılmıştır [28, 56, 57].

3.3.1.2. AlN Kaplama

AlN kaplamanın genel özellikleri; ortalama sertlik değeri 2000 ± 200 HV, ortalama oksidasyon sıcaklığı 700 °C, ortalama sürtünme katsayısı 0,45, ortalama yüzey pürüzlülüğü $0,2$ μm , ortalama kaplama kalınlığı $1-6$ μm ve kaplama rengi beyaz gri şeklinde genellenebilir. AlN kaplamaların Al elementi etkisiyle sürtünme katsayısı nispeten daha düşük olmaktadır. AlN kaplama tabakasının kolay soğuyup ısıyı emen bir yapısı olması nedeniyle soğutma sanayisinde, yüksek sıcaklıklara maruz kalan makine elemanlarında, kesici ve delici uçlarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur [58, 59].

3.3.1.3. ZrN Kaplama

ZrN kaplamanın genel özellikleri; ortalama sertlik değeri 2800 ± 200 HV, ortalama oksidasyon sıcaklığı 600 °C, ortalama sürtünme katsayısı $0,61$, ortalama yüzey pürüzlülüğü $0,2$ μm , ortalama kaplama kalınlığı $2-3$ μm ve kaplama rengi açık sarı şeklinde genellenebilir. ZrN kaplamalar genel olarak TiN ile benzer karakteristiklere sahiptir. İyi aşınma direncine, yüksek sertliğe ve sünekliğe, ayrıca düşük sürtünme katsayısına sahiptir. İyi yüzey kalitesine sahip bir kaplamadır. Bunlara rağmen yüksek kayma hızlarında adeziv aşınma dayanımı nispeten daha düşük olmaktadır. ZrN kaplamanın oda sıcaklığında kaplanmamış yüzeye göre aşınma dayanımının % 31 fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ancak artan sıcaklıklarda sürtünme katsayısı artmaktadır. ZrN kaplamalar, biyouygunluğundan ve iyi korozyon direncinden dolayı tıbbi/cerrahi aletlerde sıklıkla kullanılmaktadır [9, 28, 56].

3.3.1.4. TiAlN Kaplama

TiAlN kaplamanın genel özellikleri; ortalama sertlik değeri 3600 ± 400 HV, ortalama oksidasyon sıcaklığı $800-900$ °C, ortalama sürtünme katsayısı $0,42$, ortalama yüzey pürüzlülüğü $0,2$ μm , ortalama kaplama kalınlığı $2-5$ μm ve kaplama rengi siyah-füme şeklinde genellenebilir. TiN kaplamalar ortalama 550 °C sıcaklıkta okside olurken, TiAlN kaplamalar 900 °C sıcaklığa kadar okside olmayan özelliğe, yüksek sertliğe ve düşük termal iletkenliğe sahiptir. TiAlN kaplama tabakasının oksidasyon sıcaklığı değerinin daha yüksek olmasının temel nedeni, fonksiyon yüzeyinde koruyucu bir amorf olan Al_2O_3 filminin oluşmasıdır. Pek çok endüstriyel uygulamada TiAlN kaplama tabakası TiN kaplamaların yerini almıştır. Çok katlı (7-9 kat) olarak uygulanması durumunda yüksek tokluk ve iyi aşınma dayanımı özelliklerini bir arada taşıyan bir kaplama çeşididir. TiAlN kaplama ile kesici takımlarda, yüksek kesme hızlarında ve takım ısınmasının fazla olduğu sürekli talaş kaldırma işlemlerinde yüksek verim elde edilebilmektedir [9, 28, 60, 61, 62].

3.3.1.5. AlTiN Kaplama

AlTiN kaplamanın genel özellikleri; ortalama sertlik değeri $3800-4200$ HV, ortalama oksidasyon sıcaklığı $900-1100$ °C, ortalama sürtünme katsayısı $0,6$, ortalama yüzey pürüzlülüğü $0,25$ μm , ortalama kaplama kalınlığı $1-4$ μm ve kaplama rengi siyah-mor

şeklinde genellenebilir. Yüksek alüminyum içeriğine sahip siyaha yakın mor renkli AlTiN kaplama, sert kaplamalar içerisindeki en yüksek oksidasyon sıcaklığına sahip kaplamalardan birisidir. Isıl kalkan oluşumu etkisi sebebi ile yüksek sıcaklıkların olduğu kesme işlemlerinde yüksek sertlik özelliğinin korumaktadır ve birçok endüstriyel uygulamada başarı ile uygulanmaktadır. TiN kaplamalara Al elementinin eklenmesiyle kaplama kalitesi oldukça iyileştirilmiştir. Özellikle AlTiN kaplamaların TiN kaplama tabakasına göre sertliği oldukça yüksek olmaktadır [7, 13, 28, 61, 62].

3.3.1.6. TiZrN Kaplama

Yapılan birçok çalışmada TiN'e Zirkonyum (Zr) elementi ilave edilmesiyle meydana gelen TiZrN kaplamalar, daha iyi bir aşınma direnci sağlamaktadır. Bununla birlikte oksidasyon sıcaklığı artmaktadır ve aynı zamanda da sertlik değerinde dikkate değer bir artış olmaktadır. Sağladığı bu üstün özelliklerin deneysel çalışmalar ile belirlenmesi ve endüstriyel alanda birçok farklı amaca yönelik uygulamalarda başarıyla kullanılması neticesinde TiN esaslı kaplama tabakası bileşimlerine Zr elementi sıklıkla ilave edilerek kullanılmaktadır [9].

3.3.1.7. TiAlZrN Kaplama

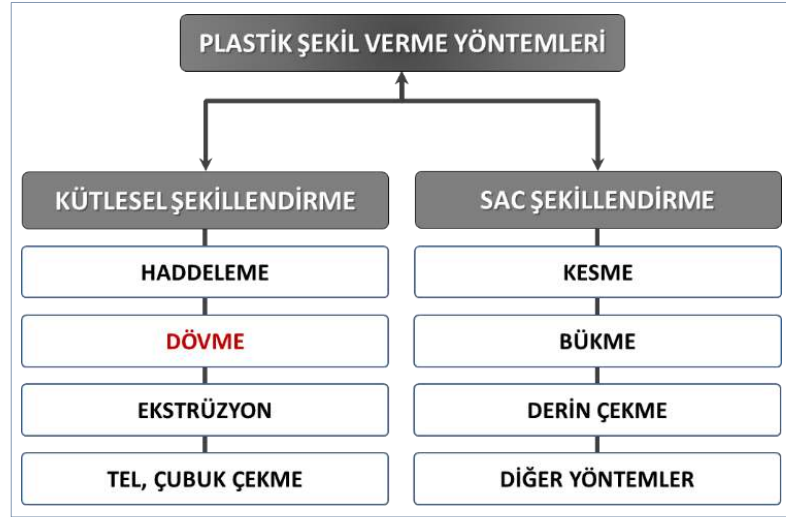
TiAlN kaplamalara Zr elementi ilavesi sayesinde kaplama tabakasının özellikle aşınma dayanımında makul değerlerde artış sağlandığı literatür bilgisinde bulunmaktadır. Bununla birlikte kaplama tabakasının genel olarak tribolojik özelliklerinin TiAlN bileşimli tabakaya göre oldukça iyileştirildiği yönünde bulgular literatürde paylaşılmaktadır. Daha önceki çalışmalarda yapılan deneysel incelemelerin sonuçlarına göre, Zr elementinin kaplama sürecindeki hedef malzeme akımının ve diğer değişken kaplama parametrelerinin etkilediği kaplama yapısındaki atomik oranı, elde edilen kaplama tabakasının aşınma özelliklerini değiştirebilmektedir. Zr elementinin kaplama tabakasına ilave edilmesi genellikle sertlik ve dolayısıyla plastik deformasyon dayanımının iyileştirilmesi amacıyla yönelik olurken Zr elementi ile birlikte Al elementinin de kullanılması kaplamaya kazandırılan bu özelliklerin yanı sıra yüksek sıcaklıkların etkisinin azaltılması ve daha düşük sürtünme katsayısı özelliğinin kaplama tabakasına kazandırılması amacıyla yönelik olmaktadır [63, 64].

4. UYGULAMALARDA DARBELİ YÜK ETKİSİ

Endüstriyel uygulamalarda özellikle imalat sektöründe ekstrüzyon ve dövme kalıpları gibi elemanların aşınma problemleri, üzerinde önemle durulan bir konudur. İmalatta kullanılan kalıpların ömürlerinin artışı aşınma dayanımları ile orantılıdır. Aşınma dayanımları iyileştirilen kalıp elemanlarında hasar mekanizmalarının oluşumu daha geç olacağından kullanım ömürleri artmaktadır. Kalıp elemanlarının kullanım ömürlerinin artması, zaman kayıpları ya da üretim sarfiyatlarının önüne geçilmesi sayesinde maliyet bakımından firmalara ciddi kazançlar sağlamaktadır. Takımların aşınma kaynaklı kullanım ömürlerini sınırlayıcı etkileri azaltmak için yüzeyleri aşınmaya dayanımlı sert kaplamalar ile kaplanmaktadır. Bu anlamda kalıp elemanlarının kullanım şartları dikkate alınarak bilimsel çalışmalar ışığında kaplamalardan beklenen performansla sahip olmaları sağlanmaktadır. Bahsedilen imalat elemanlarının aşınma dayanımlarının artırılması için uygulanan kaplama özellikleri, kullanım koşulları iyi analiz edilerek belirlenmelidir. Bu alanda üretim kalıplarında, öncelikli olarak darbeli yüklemelerin etkilerinin araştırılması aşınma çözümleri için kritik bir öneme sahip olmaktadır. Bu konu tribolojik bilimsel çalışmalarda üzerinde önemle durulan ve imalat sektörünün de son zamanlarda oldukça dikkatini çeken bir uygulama alanı olmaktadır. Sanayi uygulamalarında, darbeli yüklemelerin uygulanan nanoyapılı ince sert kaplamaların aşınma davranışına etkisinin araştırılacağı imalat alanlarının başında dövme yöntemi ile üretim teknikleri gelmektedir [65].

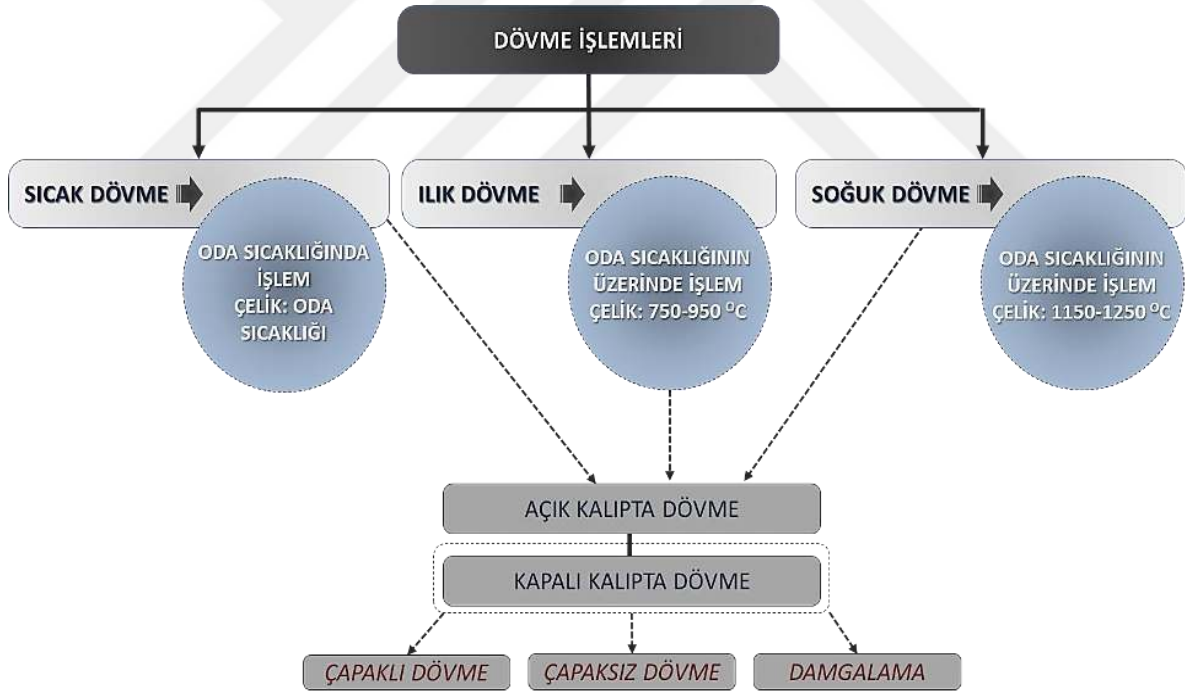
4.1. Darbeli Yük Etkisi İle Üretim Uygulaması

Metallerin plastik şekil verme kabiliyetleri sayesinde sanayide birçok üretim yöntemi geliştirilmiştir. Şekil 31’de genel olarak metallerin plastik şekil verme yöntemi ile üretim metotlarının sınıflandırılması gösterilmektedir. Bu yöntemler arasında, sünek malzemelerin plastik şekil değişim kabiliyetleri sayesinde talaşsız üretim yöntemi olarak uygulanan dövme işlemi sanayide oldukça geniş bir üretim yelpazesine sahiptir. Malzemelerin plastik şekil değişimi sırasındaki davranışları; malzemenin kimyasal bileşimi, içyapısı, şekil verme sıcaklığı ve şekil verme hızına bağlıdır. Şekil değişimi sırasında işlenen malzemenin sıcaklığına bağlı olarak plastik şekil değişimi, “soğuk şekil değiştirme” ve “sıcak şekil değiştirme” olarak ikiye ayrılır [65, 66, 67].



Şekil 31. Plastik şekil verme yöntemlerinin genel sınıflandırılması [68].

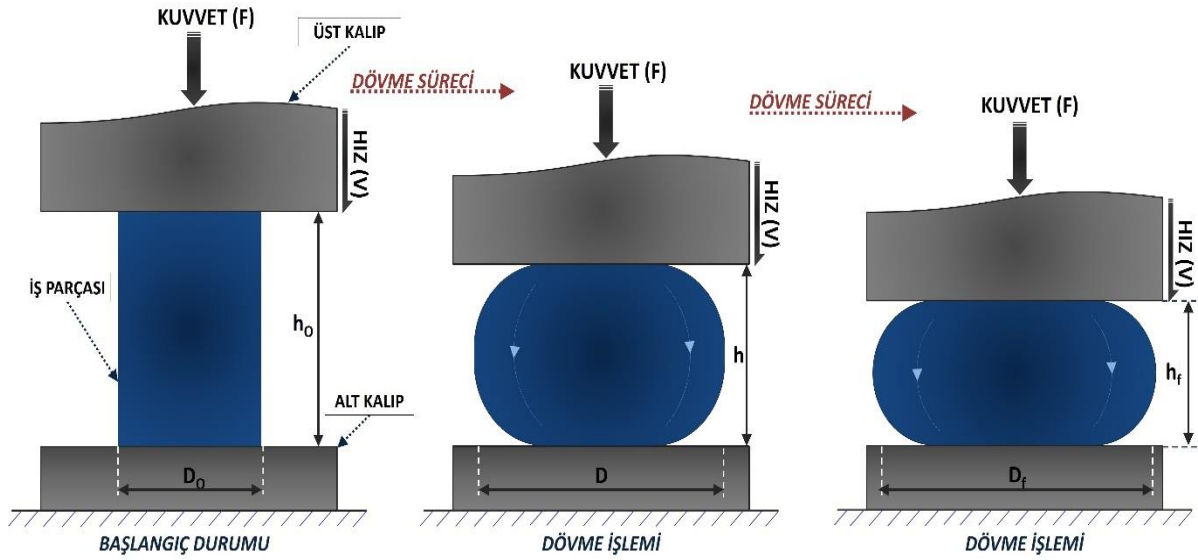
4.1.1. Dövme Üretim Yöntemi



Şekil 32. Dövme işleminin sınıflandırılması [65, 66].

Dövme, darbe veya basınç altında kontrollü bir plastik deformasyon sağlanarak, metale istenen şekli verme, tane boyutunu küçültme ve mekanik özelliklerini iyileştirme amacıyla uygulanan bir plastik şekil verme yöntemidir. Endüstride en çok tercih edilen imalat yöntemlerindendir. Özellikle dayanımlı malzemelerin üretiminde başvurulan temel

makine elemanı üretim şeklidir. Şekil 33'te genel olarak dövme işlemi şematize edilmiştir. Bu işlem, uygulama sıcaklığına göre genel olarak “soğuk dövme”, “ılık dövme” veya “sıcak dövme” olarak gruplandırılmaktadır. Aynı zamanda dövme işlemi kullanılan dövme kalıbı çeşidine göre “açık kalıpta dövme” ve “kapalı kalıpta dövme” olarak sınıflandırılmaktadır. Kapalı kalıpta dövme yönteminin “çapaklı dövme”, “çapaksız dövme” ve “damgalama” gibi çeşitleri bulunmaktadır [65, 66, 67].



Şekil 33. Dövme işleminin şematik gösterimi [65].

4.1.1.1. Dövme Kalıplarında Oluşan Genel Hasarlar

Dövme işleminde, dövme kalıp elemanları tekrarlı mekanik ve termal yüklemelere maruz kalmaktadır. Dövme kalıplarında tekrarlı mekanik ve termal yükler; erozyon, plastik deformasyon, termal ve mekanik yorgunluk gibi kalıp elemanı yüzeyinde ağır hasarlara neden olan etkiler oluşturmaktadır. Dövme kalıplarında, ağır yüke maruz kalan alanlar, çentik etkisi oluşturacak olan iç köşeler ve şekillendirme sırasında yüksek sıcaklık değerlerine ulaşan kısımlar kalıp ömrünü belirleyici bir rolü olan kalıbın hasara uğramasına neden olan kritik bölgelerdir. Kalıbın hasara uğrayarak kullanılamaz hale gelmesine neden olan temel etken kalıp çalışma yüzeylerinde bu etkiler sonucunda meydana gelen farklı aşınma türleri olmaktadır. Dövme kalıplarında meydana gelen boyutsal değişimler, gerilmelere ve deformasyon oluşumuna neden olmaktadır. Dövme kalıplarının bozulması genellikle aynı anda oluşabilen ve birlikte çalışan birkaç işlemle ilişkili olmaktadır. Ancak

normalde bunlardan biri hâkimdir ve bu da başarısızlığın temel-nihai sebebidir. Dövme kalıplarında genel olarak; aşınma, mekanik çatlaklar, termal çatlaklar ve plastik deformasyon şeklinde dört farklı hasar mekanizması ayırt edilebilir [69, 70]:

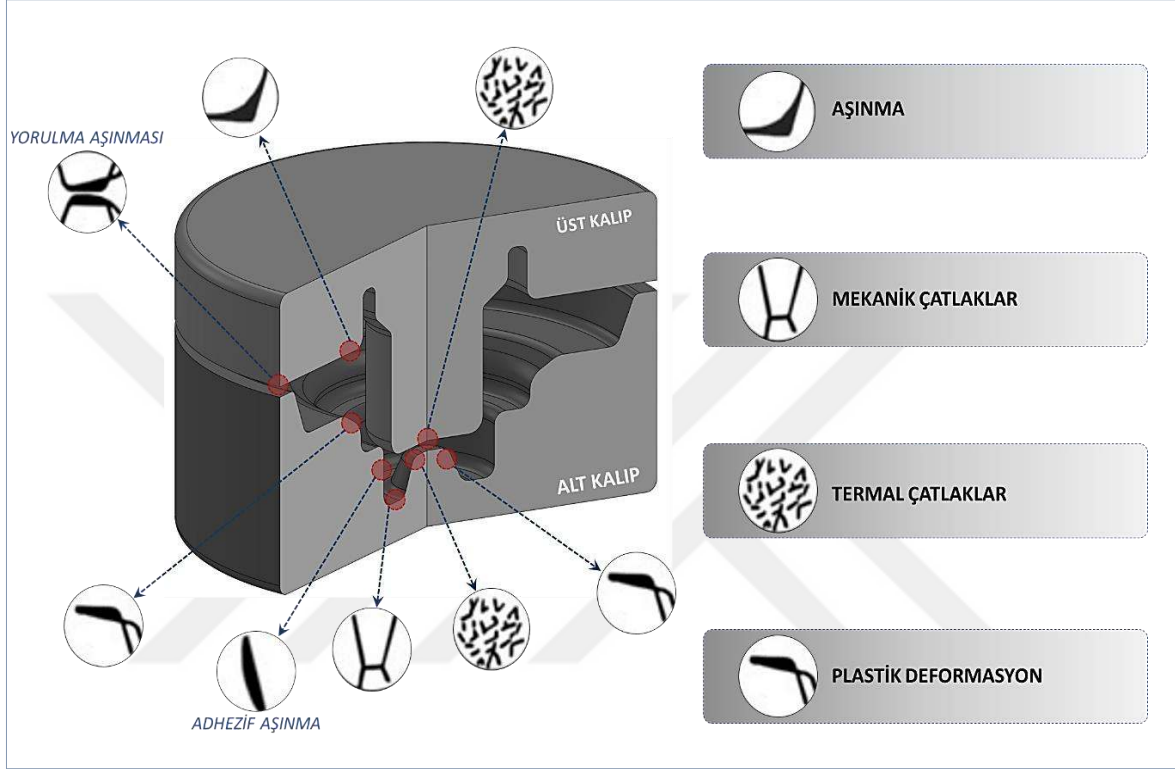
Aşınma: Diğer tüm hasar mekanizmaları bastırılrsa dahi, bir dövme kalıbı nihayetinde aşınır. Aşınma, iş parçasının yüksek basınç etkisi altında kalıp fonksiyon yüzeylerinde oluşturduğu darbe ve kayma etkisi sonucunda meydana gelmektedir. Aşınma en çok dışbükey yarıçaplarda belirgindir [69].

Mekanik Çatlaklar: Dövme kalıplarının yüzeylerinde dövme işlemi sırasında zorlanmalar neticesinde mikro ölçekli çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar zamanla bir çatlak ağı olarak yayılarak makro çatlak oluşumuna neden olur. Kalıp yüzeylerinde ilk aşamada mikro çatlaklar, dövme süreçlerinde tek bir döngü esnasında veya birkaç döngü sonucunda meydana gelebilir. İkinci aşamada ise, dövme işleminin uygulanması sürecinde çatlaklar yüksek gerilimli yorgunluk mekanizmalarının etkisiyle büyüyerek ilerler. Sonuç olarak kalıp kırılarak hasara uğrar [69]. Kalıplarda oluşan çatlama hasarları; aşırı yükleme durumu, kalıp tasarım özellikleri, yapısı ve şekli, kalıbın yetersiz ön ısıtılması, kalıp çeliğinin yetersiz tokluğu (yanlış kalıp malzemesi seçimi), çok yüksek kalıp malzemesi sertliği, kalitesiz ısıtma işlem veya yüzey işlemleri, yetersiz kalıp desteği ve hizalama hatalarının biri veya birkaçının birleşiminden kaynaklanmaktadır [69].

Termal Çatlaklar: Dövme sürecinde, kalıp elemanları yüzeylerinin dövme döngüsü sırasında aşırı sıcaklık değişikliklerine maruz kalması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu tür sıcaklık değişiklikleri, kalıp yüzeyinde düşük devirli yorulma mekanizması yoluyla sonunda çatlama yol açan termal gerilmeler oluşturur. Termal yorulma çatlama; çok yüksek sıcaklıktaki kavite yüzey (aşırı kütük sıcaklığı ve/veya uzun temas süresi), döngüler arasında kalıp yüzeyinin aşırı soğutulması, kalıbın yetersiz ön ısıtması ve yanlış kalıp çeliği seçimi veya zayıf ısıtma işlem uygulaması gibi faktörlerle artmaktadır [69].

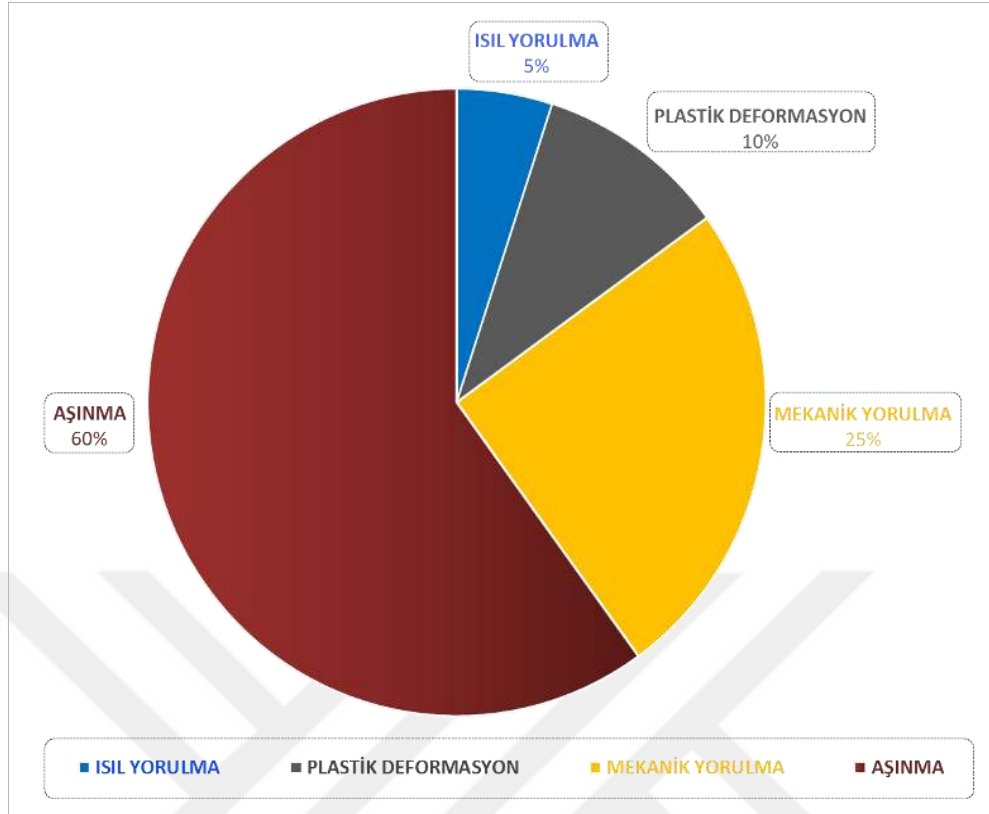
Plastik Deformasyon: Dövme proseslerindeki kalıp elemanlarının, kalıp çeliğinin akma mukavemetini aşan streslere maruz kaldığında meydana gelen kalıp bozulmasıdır. Plastik deformasyon, küçük dışbükey yarıçaplarda veya uzun ince takımlarda oldukça yaygındır. Dövme kalıplarında plastik deformasyonun nedenleri; çok düşük kütük sıcaklıkları (iş malzemesinin yüksek akış gerilimi), kalıp çeliğinin yetersiz sıcak mukavemeti, kalıp sıcaklığının çok yüksek olması ve kalıp malzemesinin çok yumuşak olması olarak sıralanabilir [69].

Şekil 34'te dövme kalıplarında meydana gelen başlıca hasar mekanizmaları gösterilmektedir. Dövme kalıplarındaki hasar mekanizmalarının iyi analiz edilmesi, yüzeylerine uygulanacak sert kaplama özelliklerinin belirlenmesi ve deneysel çalışmalarda yapılan incelemeler için önemlidir.

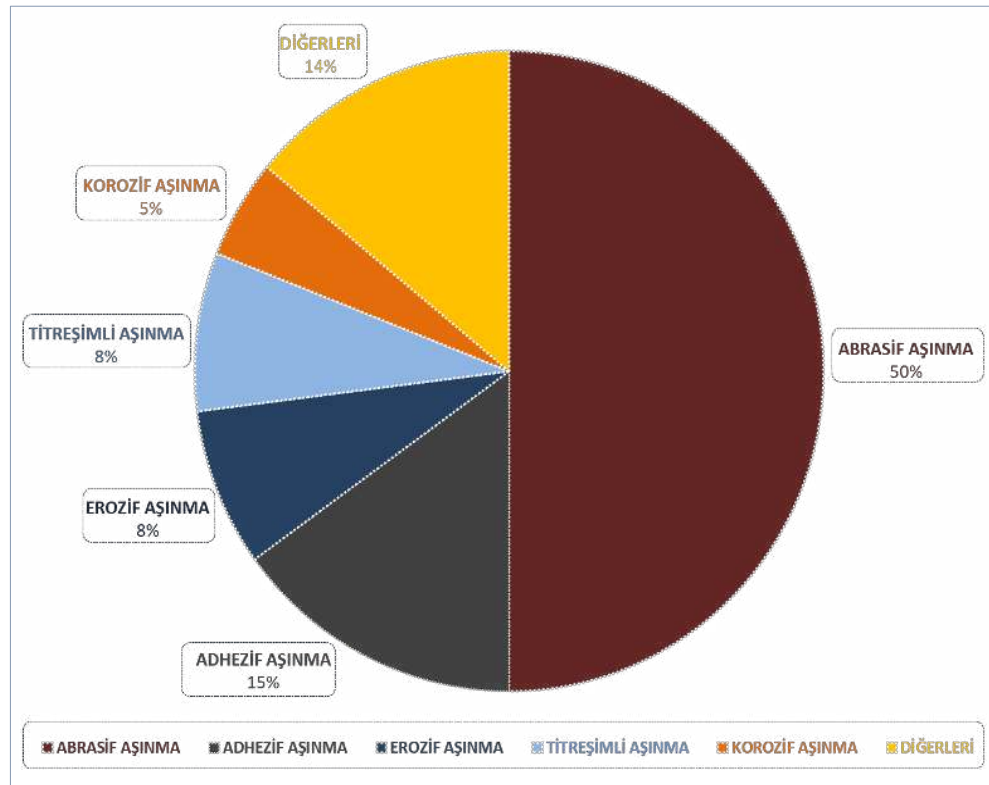


Şekil 34. Dövme kalıplarında meydana gelen başlıca hasar tipleri [71, 72].

Dövme kalıpları üzerinde analiz edilen süreçler ve sonuçların değerlendirilmesi sonrası elde edilen verilere göre, kalıpların düşük dayanıklılığının ana nedeni, malzemenin en büyük deformasyonunun görüldüğü bölgelerdeki kalıp yüzeylerinde meydana gelen aşınmadır. Dövme kalıplarının çalışma yüzeylerinde meydana gelen bölgesel hasarlar nedeniyle dövülen malzeme ile dövme kalıbı arasında oluşan aşırı sürtünme, dövülen malzemenin dövme kalıplarının yüzeyine aşırı şekilde yapışmasına neden olmaktadır. Böylece meydana gelen aşırı sürtünme, kalıpların aşırı ısınmasına neden olmaktadır. Dövme kalıp malzemesinin içeriğindeki malzeme bileşiklerinin dövülen malzemenin içeriğindeki malzeme bileşikleri ile benzerlikte olması dövülen malzeme ile dövme kalıpları arasında yapışmayı artırıcı bir etki oluşturmaktadır [73, 74]. Şekil 35 ve Şekil 36'da yukarıda bahsedilen dövme kalıbı hasar mekanizmalarının oranları yüzde olarak belirtilmiştir.



Şekil 35. Dövme kalıplarında karşılaşılan hasar türleri ve sıklıkları [52].



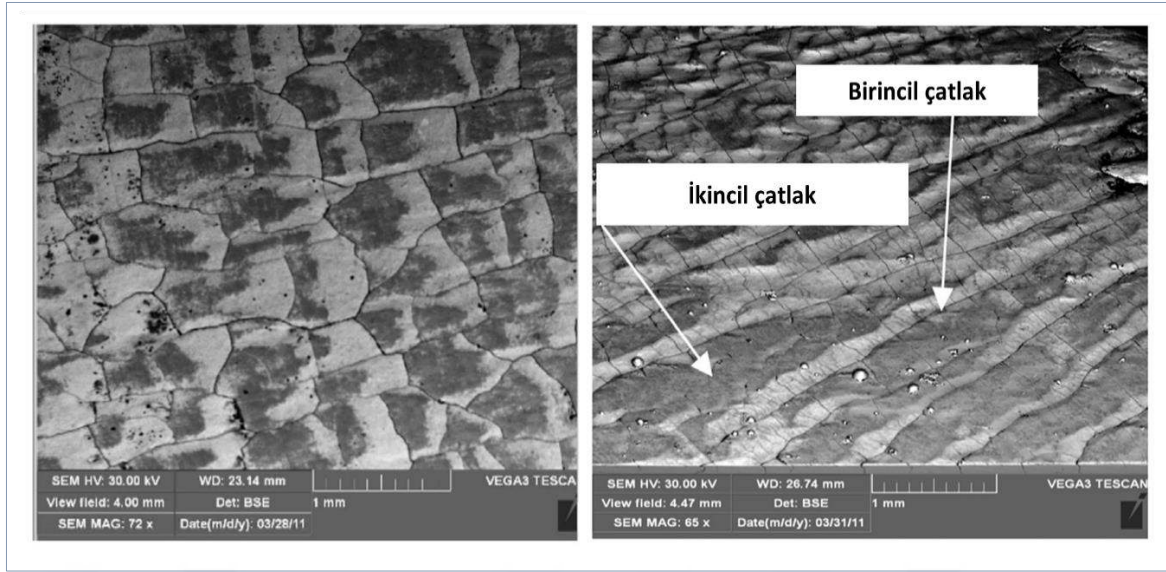
Şekil 36. Dövme kalıplarında meydana gelen aşınma türleri ve oranları [75].

Şekil 35'te gösterildiği gibi dövme kalıplarında meydana gelen hasar türünün % 60 oranla aşınmadan kaynaklandığı belirlenmiştir. Şekil 36'da gösterilen grafikten görüleceği gibi aşınma hasarının ise % 50 oranla en fazla abrazif aşınma mekanizması ile gerçekleştiği ortaya konulmaktadır. Dövme kalıplarında kalıpların yüzeylerinde meydana gelen aşınma, dövme kalıpları yüzeyleri ile dövülen parça arasında dövme işlemi sürecinde en uzun süre temasın gerçekleşmiş olduğu yüzeyde meydana gelmektedir [76].

Dövme kalıplarında kalıp karmaşık termo-mekanik yükleme koşullarına maruz kalmaktadır. Yapılan araştırmalar göstermektedir ki, dövme sürecinde oluşan en olumsuz faktör kalıp yüzeylerinde meydana gelen termo-mekanik yorgunluktur. Şekil 37'de kaplama uygulanmış bir dövme kalıbının yüzey görünümü gösterilmektedir. Belirli dövme döngüsü sayısında yüzeyde termo-mekanik etkilerle çatlaklar oluşmaktadır. Bu çatlaklar genellikle termo-mekanik etkilerle aşınmadan kaynaklanmaktadır. Şekil 38'de aşınmaya uğramış kaplama tabakasının detay görünümü sunulmaktadır. Bu görüntüde görüldüğü gibi çatlaklar birincil çatlaklar olan ana çatlaklarla başlar ve yayılır ve sonrasında ikinci çatlaklar meydana gelir. İkincil çatlaklar birincil çatlaklarla birleşerek yüzeyde hasara neden olan çatlak ağını oluştururlar [76].



Şekil 37. Dövme kalıplarında meydana gelen termo-mekanik çatlak ağı [76].



Şekil 38. Termo-mekanik çatlak ağı detayı [76].

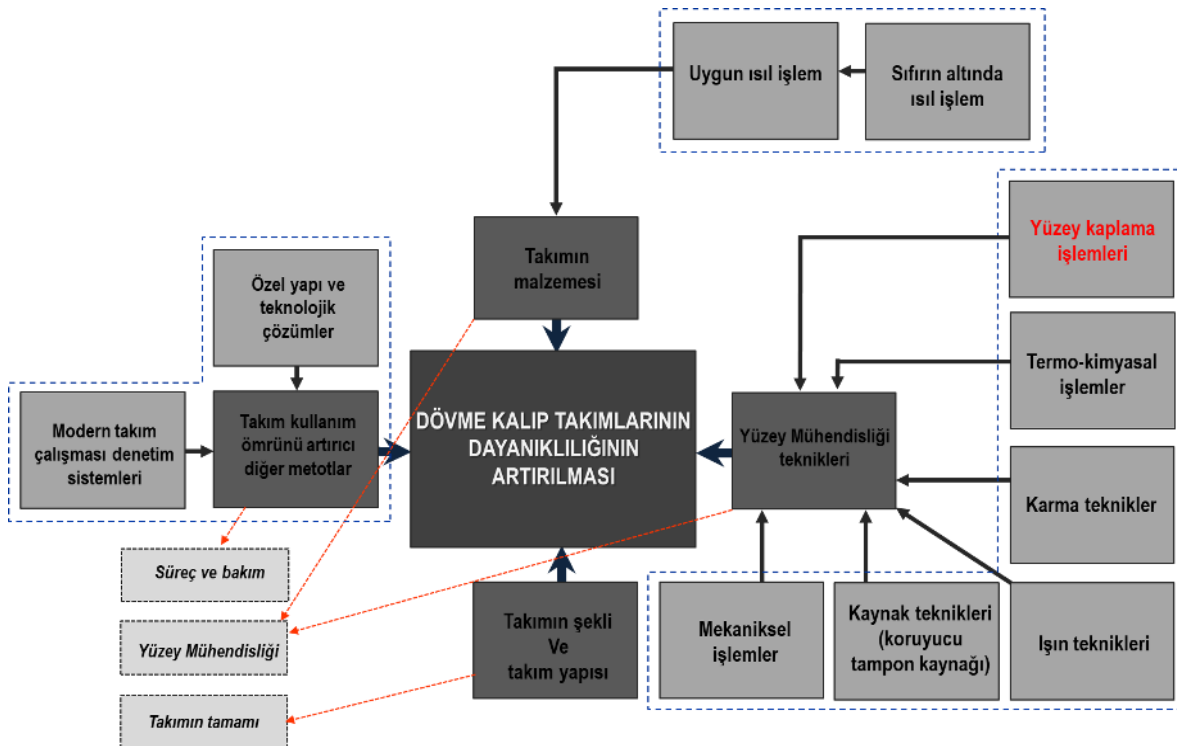
Dövme kalıpları yüzeylerinde meydana gelen termo-mekanik yorgunluk temas yüzeyi boyunca yayılan ve gelişen bir çatlak ağının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca kalıpta meydana gelen aşınma, termo-mekanik yorgunluk neticesinde meydana gelen aşındırıcı oksit partiküllerinin oluşması nedeni ile yoğunlaşmakta ve yükselmektedir. Termo-mekanik yorgunluk neticesinde oluşan ince yapılı çatlaklar hızlı bir şekilde bir çatlak ağı oluşumuna neden olmaktadır. Bu çatlak ağları sonrasında ikincil bir çatlak ağı gelişmesi ile sonuçlanmaktadır. Bütün bu durumlar birlikte değerlendirildiğinde, dövme kalıp yüzeyinde yapılacak olan aşınma hasarı iyileştirmesinin kalıp yüzey kaplamasının termo-mekanik yorgunluk faktörünün iyileştirilmesi ile sağlanabileceği sonucuna varılmaktadır. Aynı şekilde kalıp yüzey kaplamasının termo-mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile başlangıçta mikro çatlak olarak oluşup sonrasında büyük çatlaklara dönüşerek kalıp yüzeyinde makro hasara yol açacak olan çatlak ağı oluşumunun ve kaplamada yoğun aşınmaya neden olacak aşındırıcı oksit partikülleri oluşumunun engellenmesi gerekmektedir [77].

4.1.1.2. Dövme Kalıplarında Oluşan Hasarın Önlenmesi

Endüstriyel uygulamada bir dövme firması için maliyetleri düşürmek en önemli konulardan biridir. Maliyetleri düşürmek için en önemli faktör kalıp maliyetlerini düşürmektir. Bu anlamda dövme işleminde üretim maliyetlerini düşürmek için bazı uygulamalar yapılmaktadır. Dövme kalıplarının servis ömrünü iyileştirmek kalıp

maliyetlerini düşürmek için oldukça önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Kalıp elemanlarında hasar oluşumuna neden olan ve kalıp maliyetlerini etkileyen en önemli faktör olan aşınma oranını azaltmak için çeşitli yüzey mühendisliği teknikleri imalat sektöründe yaygın olarak uygulanmaktadır.

Sanayide, dövme yöntemi ile üretim alanında dövme proseslerinin işlem şartlarının ve işleme etkileyen faktörlerin iyi analiz edilmesi, süreçlerde kullanılan makine elemanlarının tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi için bilimsel çalışmaları önemli ölçüde etkilemekte ve yönlendirmektedir. Şimdiye kadar, darbeli yüklere maruz kalan dövme kalıpları ya da takımların ömrünü iyileştiren yöntemlerin seçimi için net bir kriter ortaya konulmuş değildir. Yalnızca genel yönler bilinmektedir. Bu nedenle darbeli yüklemelere maruz kalan plastik şekillendirme ve dövme işlemi, işlem parametreleri veya şekillendirilmiş malzeme ile dövme kalıpları arasındaki tribolojik koşulların yanı sıra diğer birçok spesifik faktörle yakından ilişkili olması nedeniyle her sürecin, hatta işlemin ayrı ayrı analiz edilmelerini gerektirmektedir. Şekil 39, dövme prosesinde kullanılan takımların dayanıklılığının iyileştirilmesi için mevcut yöntemlerin farklı sınıflandırmalarını gösteren örnek bir diyagram sunmaktadır. Bu diyagrama göre yüzey mühendisliği tekniklerinden olan yüzey kaplama işlemleri, önemli bir çalışma alanını temsil etmektedir [76, 77].



Şekil 39. Darbeli yüklere maruz elemanların dayanıklılığını iyileştirme yöntemleri [77].

Araştırmalarda, analiz edilen dövme kalıplarının dayanıklılığı; yüzey sertliğini artırarak ve sürtünme katsayısını düşürerek kalıp yüzeylerinin aşınmaya karşı dirençlerinin artırılması sayesinde geliştirilebilmektedir. Kalıp servis ömrünü artırmak amacıyla farklı yüzey işlemleri ile kalıp yüzeyleri iyileştirilmektedir. Dövme kalıplarında aşınma hasarlarının önlenmesi için en etkili yöntemlerden biri kalıp çalışma yüzeylerinin ince sert film kaplama tabakalarıyla kaplanmasıdır. Bu başarı, nitrürleme ile matrislerin yüzeyinde biriken sert PVD kaplama işlemleri ile elde edilebilmektedir [74]. Kalıp servis ömrünü artırıcı etkiye sahip olan yüzey kaplama tekniğinde minimum maliyeti oluşturacak ve servis ömrünü artıracak şekilde en iyi yüzey işlemi belirlenmelidir. Dövme kalıplarının yüzeylerinin ince sert kaplamalar ile kaplanması ve kaplamanın uygulama alanına göre gereksinimleri sağlayacak kriterlere sahip olması amacına yönelik bilimsel çalışmalar önemli bir çalışma alanını oluşturmaktadır. Bunun için geliştirilen farklı kaplama türleri, deneyler yoluyla incelenerek değerlendirilmektedir [70]. Darbeli yüklerin etkisi altında çalışan kalıplara uygulanmış olan sert kaplamaların avantajları şöyle sıralanabilir [56]:

- Aşınmaya karşı yüksek bir dayanım sağlar,
- İşlem sırasında parçanın kalıba yapışmasını engeller,
- Sürtünme katsayısını azaltır ve pres takımlarının daha rahat çalışmasını sağlar,
- Çekme matrislerinde mükemmel yüzey kalitesi oluşturur,
- Kalıbın tolerans dışına çıkma süresini 6-8 kat uzatır.

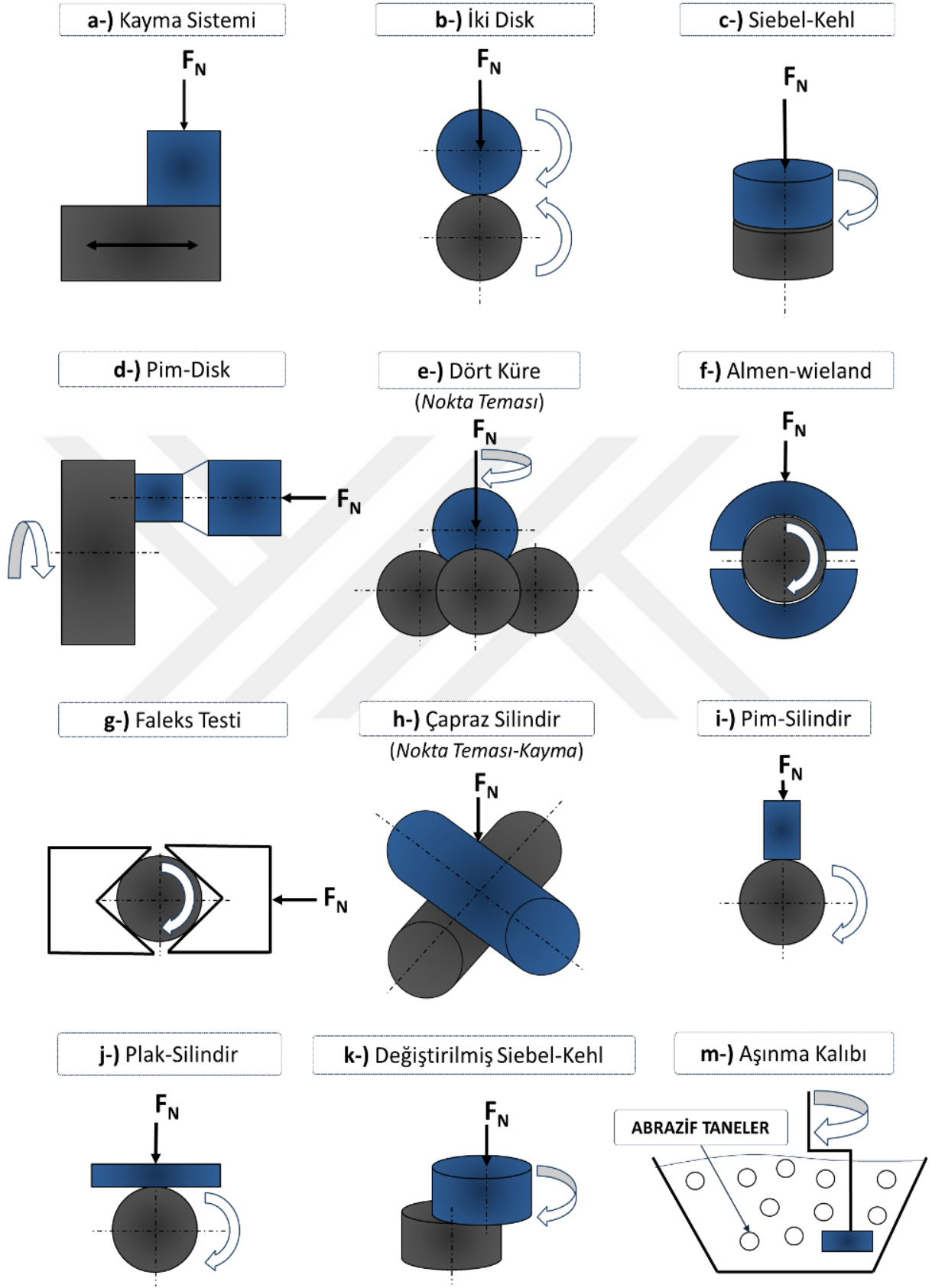
Kalıp ömrünün iyileştirilmesi için genellikle sertlik mi yoksa süneklik mi artırılması gerektiği sorgulanan ve araştırılan bir konudur. Bu konuda araştırmalar göstermektedir ki düşük çevrimli (low-cycle) yorgunluk aralığında süneklik daha önemlidir, oysa yüksek çevrimli yorgunluk aralığında mukavemet önemli hale gelmektedir. Kalıp elemanında oluşan hasar mekanizmalarının başında gelen aşınma mekanizmalarının oluşumunun ve gelişmesinin önlenmesi amacıyla esas olarak sertlik artışı için yapılan iyileştirici eylemlerin oldukça başarılı olduğu araştırmalar doğrultusunda ortaya konulmuştur [76, 77, 73].

Dövme kalıplarında aşınma nedeniyle meydana gelen hasarların önlenmesi için kalıpların yüzeylerine uygulanacak olan sert kaplamaların aşınma dayanımlarının laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar ile test edilmesi, dövme kalıplarının aşınma dayanımlarının artırılması için gerekli önemli bir aşamadır. Dövme kalıp malzemelerinin aşınma testleri darbeleri-kayma aşınma esasına göre uygulanmaktadır.

5. AŞINMANIN ÖLÇÜLMESİ VE SİSTEMATİK İNCELENMESİ

Aşınma testi, katı malzemelerin aşınma direncini test etmek için kullanılır. Aşınma testinin amacı, malzemelerin belirli koşullar altında çizilme aşınmasına karşı gösterdikleri dirençleri belirleyerek aşınma dirençlerini sıralayacak veya kıyaslayacak veriler üretmektir. Makine elemanlarının hasar görmesi sonucunda kullanılamaz hale gelmesinin en önemli nedenlerinden birinin aşınma kaynaklı olması, aşınmanın ölçülmesi ve sistematik incelenmesinin önemini ortaya koymuştur. Laboratuvar aşınma testleri makine elemanlarının ilgili kullanım koşullarını yansıtan sistematik deneysel yöntemler ile gerçekleştirilmektedir. Laboratuvar aşınma testleri sayesinde elde edilen aşınma mekanizmalarının incelenmesi ve aşınma oranlarının belirlenmesi sayesinde aşınma dayanımının geliştirilmesi için belirlenecek uygun verileri elde edilir. Aşınma testlerinin gerçek işletme koşulları yerine laboratuvar koşullarına indirgenerek yapılması test yöntemlerinin tasarımını etkileyen bir faktördür. Bu doğrultuda aşınma olayını incelemek ve açıklamak için tribolojik sisteme etkiyen etmenler parametre olarak kabul edilerek uygulama koşullarına göre çeşitli aşınma test yöntemleri ortaya konulmuştur. Aşınmaya etki eden etmenler yerine göre farklılıklar gösterebildiğinden ve aşınmaya maruz kalan malzeme veya malzeme çiftlerinin özellikleri büyük oranda değişken olması gibi faktörlerden dolayı aşınma son derece karmaşık bir olay olmaktadır. Tasarlanan test yöntemleri, esas olarak abrazif ve adezif aşınma mekanizmalarına bağlı olarak iki grupta geliştirilmiştir [7, 15, 28].

En çok kullanılan sürtünme-aşınma deney düzenekleri şematik olarak Şekil 40'ta bir arada gösterilmiştir. Bu düzenekler American Society of Lubrication Engineers (ASLE) araştırmaları kapsamında bulunan test düzenekleridir. ASLE tarafından aşınma için uygulanacak çok sayıda temas türü belirlenmiştir ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilecek çok sayıda aşınma test yöntemi ve metodu bulunmaktadır. Bununla birlikte aşınma test yöntemlerinin uygulamalarında bir sınırlama ya da standartlaştırma yapılmamıştır. Ancak yine de belli bir uygunluk olması açısından aşınma değerlerinin gösterimi DIN 50321 standardında verilmiştir. Aşınma testlerinde kullanılan en yaygın yöntem olan pim-disk mekanizması ASTM G99 standardında tarif edilmiştir [7, 15]. Sürtünme-aşınma sistemleri genel olarak uygulanan bir kuvvet etkisi altında döner bir eleman ile yüzeylerde aşınma meydana getirilmesi temeli üzerine kurulmuş düzeneklerden oluşmaktadır.

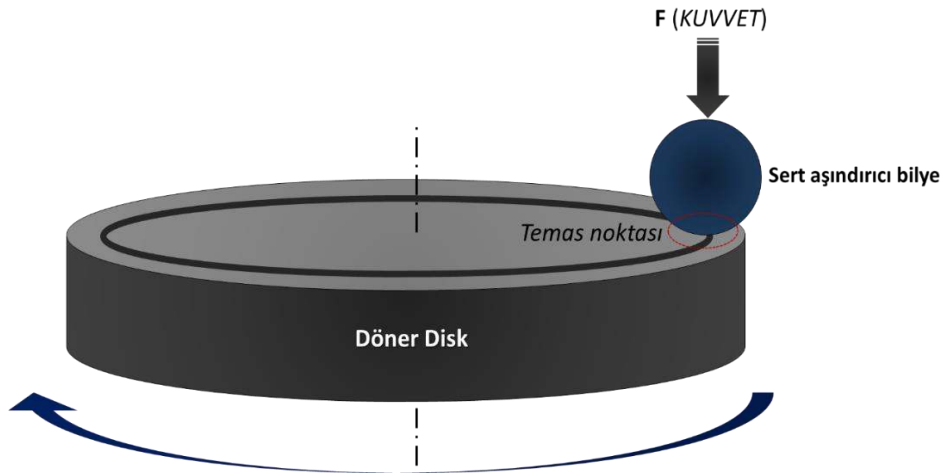


Şekil 40. En çok kullanılan sürtünme-aşınma deney düzeneklerinin bir arada şematik olarak gösterimi [7].

Aşınma deneylerinin deneysel aşınma çalışmasının yapılacağı uygulama için en yakın gerçek çalışma koşullarında sürtünme ve aşınmaya etki eden faktörleri yansıtan test düzeneği ile gerçekleştirilmesi güvenilir sonuçlar elde edilmesi bakımından önemlidir. Belirlenen test düzenekleri ile elde edilen aşınma izleri kullanılarak aşınma karakteri incelenmekte ve aşınma oranları belirlenmektedir.

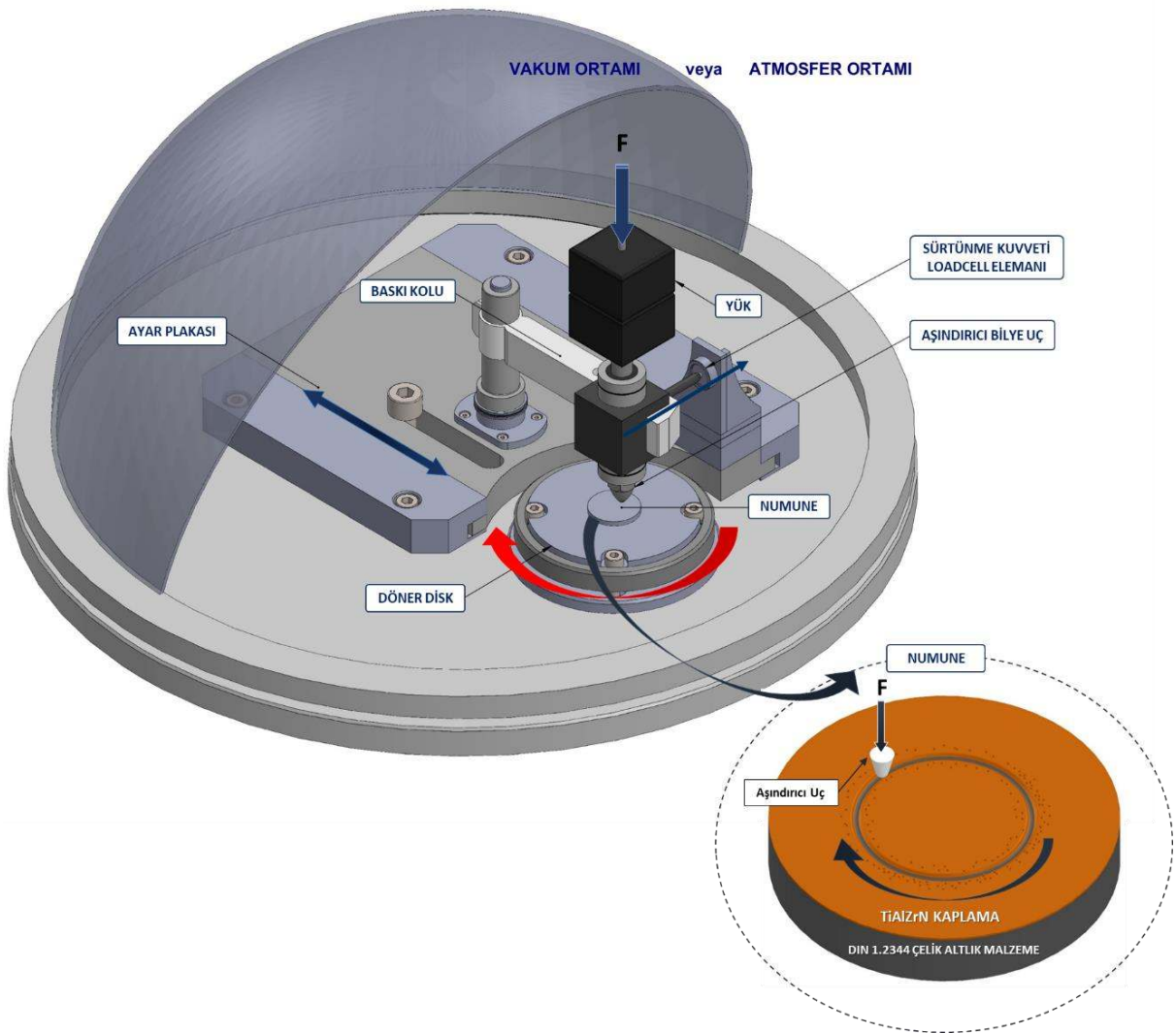
5.1. Aşınma Testi Uygulaması

Verilen sürtünme-aşınma test düzeneklerinden en yaygın kullanılan geleneksel aşınma test yöntemi pim-disk aşınma test düzeneğidir. Pim-disk test düzeneği, silindirik birkaç mm çapındaki bir pimin, döner bir disk üzerine bağlanmış numune yüzeyine kuvvet uygulaması ile aşınma izi oluşturması esasına dayanmaktadır. Burada bir kuvvet yardımıyla döner disk üzerine yerleştirilmiş olan bir test numunesi yüzeyinde sürtünme meydana getirilerek hareket mesafesi boyunca aşınma izi oluşturulmaktadır. Pim ile aşınma numunesi yüzeyleri arasında bir temas uyumu sorunu söz konusu olduğunda pim ucu yuvarlatılmış olarak kullanılabileceği gibi pim yerine aşındırıcı sert bir bilye de kullanılabilir. Esas olarak bilye-disk aşınma deney düzeneği bir çeşit pin-on-disk deney düzeneğidir. Pim-disk yönteminde aşındırıcı eleman silindirik bir pim iken bilye-disk test yönteminde aşındırıcı uç olarak sert kaplama tabakası ile kaplı bilye kullanılarak aşınma testi gerçekleştirilmektedir. Şekil 41’de geleneksel aşınma test düzeneğinin şematik görünümü verilmektedir. Genellikle uygulamada kaplama tabakalarının aşınma davranışlarının test edilmesi için aşınma testleri bilye- disk test düzeneği ile yapılmaktadır.



Şekil 41. Bilye-disk döner aşınma test düzeneğinin şematik gösterimi

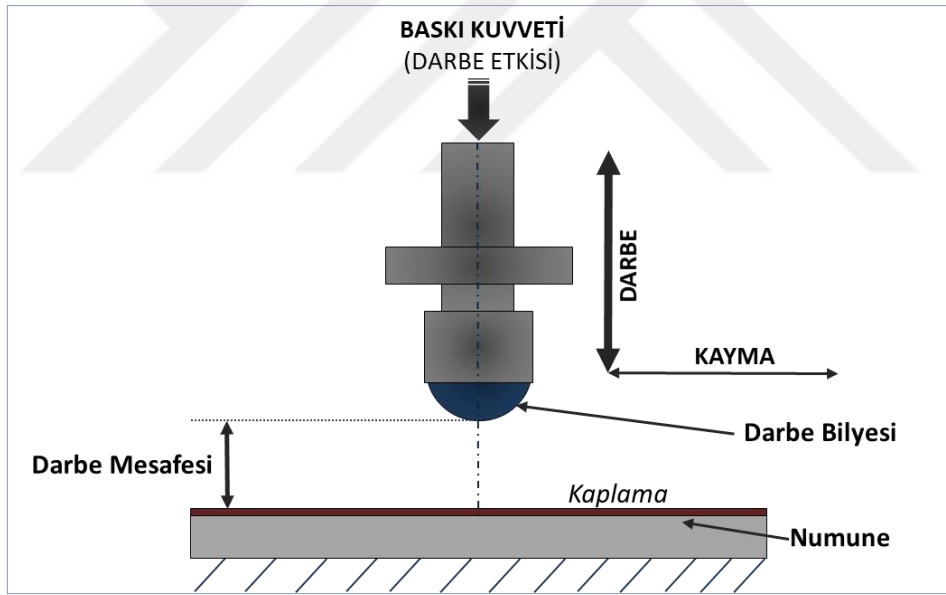
Şekil 42’de bir bilye-disk test düzeneği verilmektedir. Sistemde genel olarak döner bir disk, disk üzerinde aşındırıcı özel bilye ucun bağlı olduğu hareketli bir kol ve kuvvetleri ölçecek ölçüm birimleri bulunmaktadır. Aşınma testleri atmosfer ortamı şartlarında gerçekleştirileceği gibi vakum ortamında da gerçekleştirilebilmektedir. Döner bilye üzerindeki aşınma deney numunesine belirli bir kuvvet uygulanması için pim üzerine belirli bir değerde yük uygulanmaktadır. Aşınma metodu uygulamasında aşınmaya etki eden yük, uygulama hızı, süre (döngü sayısı) ve aşınma yolu gibi değerler aşınmanın sistematik incelenmesi için belirlenmektedir. Bu aşınma deneyi sonucunda meydana gelen aşınma genellikle çok küçük olacağından test sonucunda numune üzerinde meydana gelen aşınma profili bir profilometre ile ölçülmektedir. Belirlenen aşınma miktarları numunelerin aşınma oranlarını kıyaslayacak veriler olarak belirlenmektedir [78].



Şekil 42. Geleneksel bilye-disk (pim-disk) aşınma test düzeneği

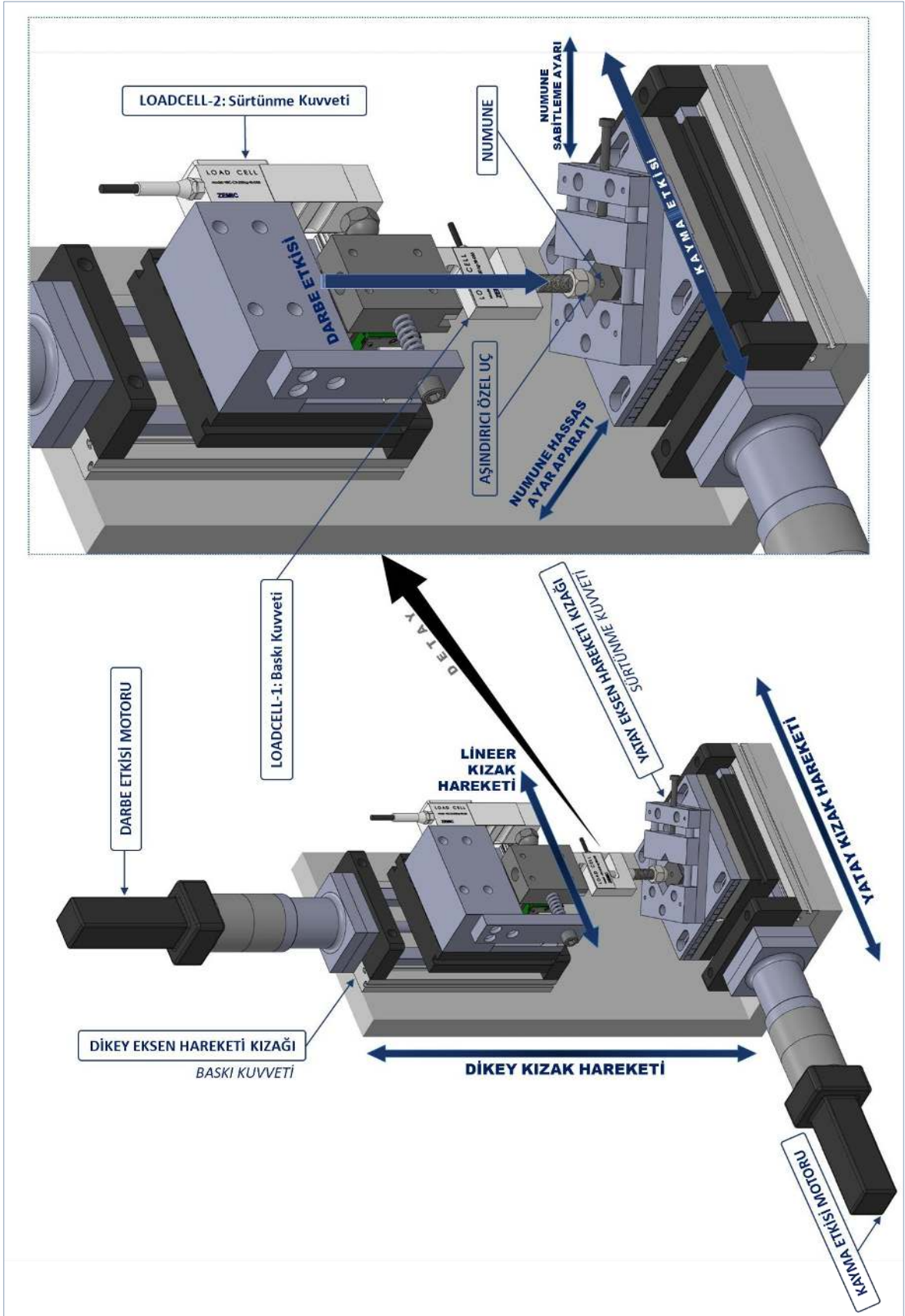
5.1.1. Darbe Etkili Aşınma Testi

Darbeli yüklere maruz kalan makine elemanları için gerçekleştirilecek olan laboratuvar darbeli-kayma aşınma deneyleri, pin-on disk test düzeneği yerine darbeli yükleme uygulamalarının çalışma koşullarını temsil edecek daha farklı deneysel düzeneklerde uygulanmaktadır. Bu doğrultuda, aşınma mekanizmalarına etki edecek faktörleri sağlayan darbeli-kayma aşınma deneyleri, darbe ve kayma etkisi oluşturulan test düzeneklerinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 43'te darbeli-kayma aşınma testleri için kullanılan test düzeneklerinin genel çalışması şematize edilmektedir. Burada aşınma deneyleri, aşındırıcı elemanın bağlı olduğu özel bir ucun baskı kuvveti yardımıyla numune yüzeyine belirli bir hızda ve mesafede darbe kuvveti oluşturması sonrasında uygulanan kuvvet devam ederken numune ve aşındırıcı uç temas halindeyken kayma hareketi oluşturularak aşınma meydana getirilmesi esası ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 43. Darbeli-kayma test uygulamasının şematik olarak gösterimi [79].

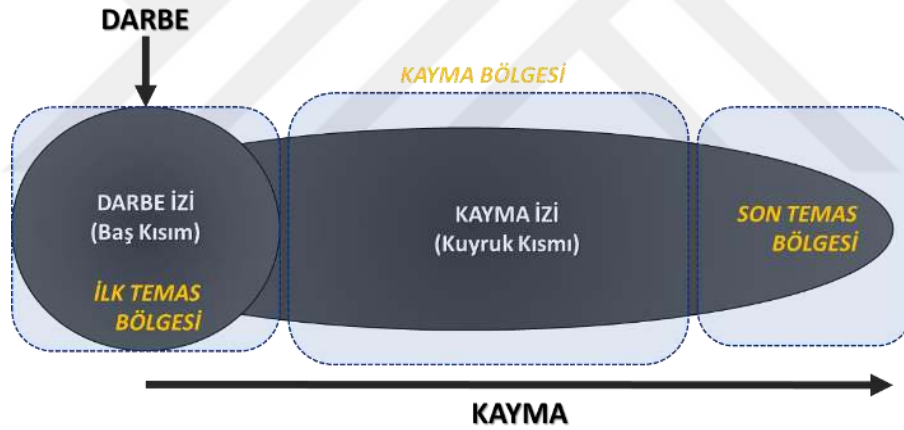
Uluslararası literatürde, darbeli yüklerin etkisi altında çalışan makine elemanlarının aşınma dayanımlarının artırılması amacıyla gerçekleştirilen çeşitli darbeli-kayma aşınma test düzenekleri mevcuttur. Ancak ülkemizde darbeli-kayma aşınma test uygulamalarında önemli bir boşluk mevcut olduğu görülmektedir. Bu amaçla geliştirilen ve çalışmadaki darbeli-kayma aşınma deneylerinde kullanılan inovatif darbeli-kayma aşınma triboloji test düzeneğinin çalışma prensibini ve bölümlerini gösteren görsel Şekil 44'te paylaşılmaktadır.



Şekil 44. Deneyisel çalışmaların uygulandığı darbeli-kayma aşınma test düzeneği ve çalışma prensibi

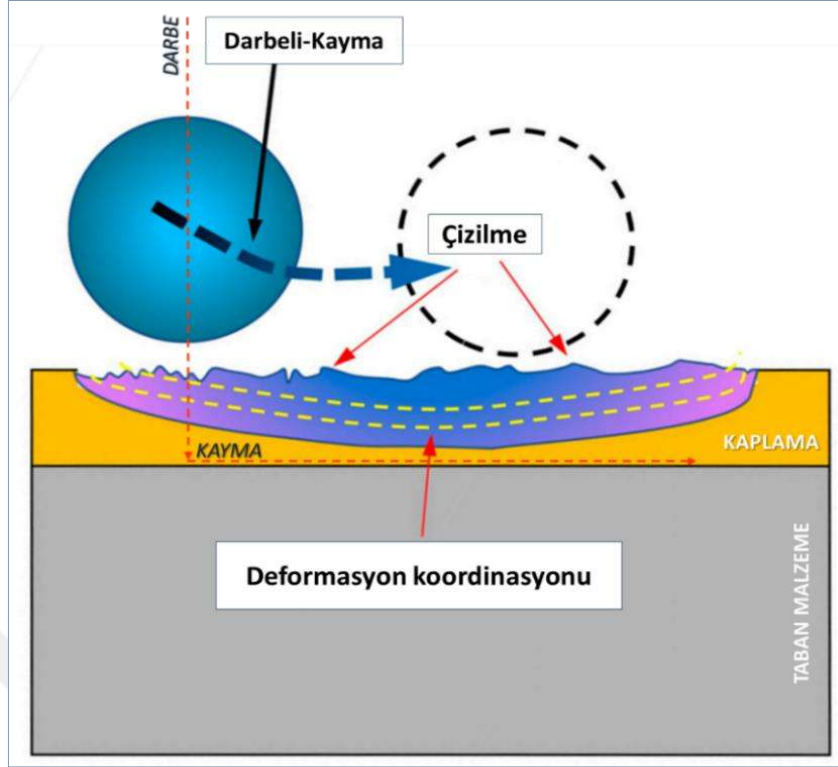
5.1.1.1. Darbeli-Kayma Aşınma Etkisinin İncelenmesi

Darbeli-kayma aşınma testlerinden elde edilen aşınma yapısı geleneksel yöntemlerden elde edilen aşınma yapısından farklı bir karakteristik özellik sergilemektedir. Şekil 45'te bir kaplama numunesi üzerinde darbeli-kayma aşınma etkisi ile elde edilen aşınma izi şematik olarak gösterilmektedir. Bu nedenle darbeli-kayma aşınma testlerinden elde edilen aşınma izlerinin yapıları ve oluşan aşınma mekanizmaları darbeli-kayma aşınma yönteminin kendi karakteristik özelliklerine göre değerlendirilmesi gerekmektedir. Etkileşim bölgesinde darbe ve kayma etkisi ile numune üzerinde oluşan aşınma izi profilinde temel olarak darbe bölgesi ve kayma bölgesi olarak iki farklı bölge meydana gelmektedir. Darbe bölgesine aşınma izinin baş kısmı ve kayma bölgesine ise aşınma izinin kuyruk kısmı da denilmektedir. Aşınma izi; 'ilk temas bölgesi', 'kayma bölgesi' ve 'son temas bölgesi' şeklinde üç temel bölgeye ayrılarak incelenmektedir [80].

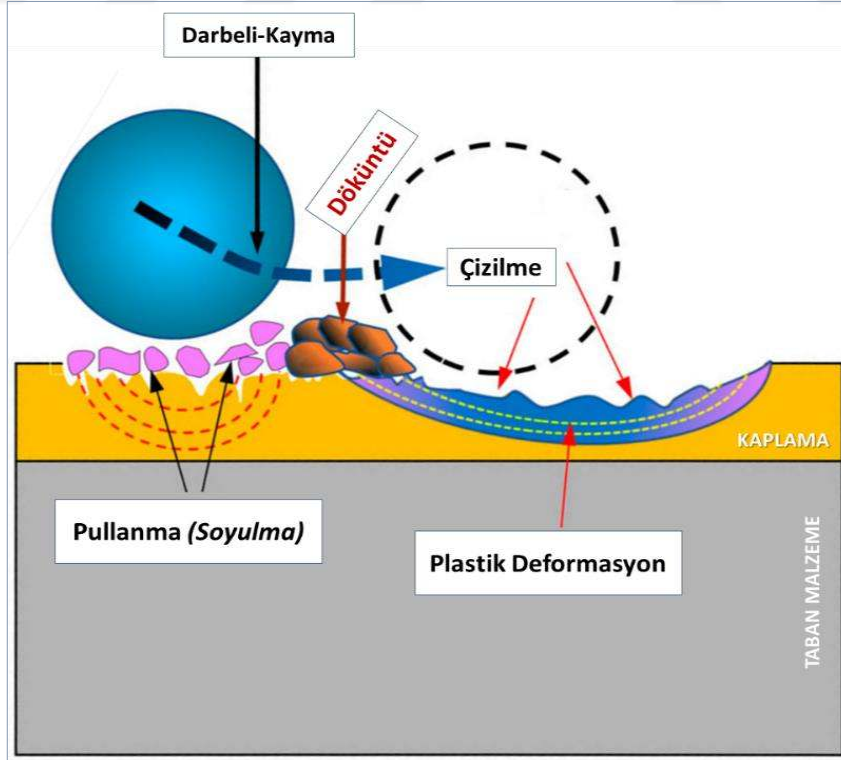


Şekil 45. Darbeli-kayma aşınma izinin gösterimi [81].

Şekil 46'da gösterildiği gibi, darbeli-kayma aşınma testlerinde, darbeli-kayma etkisi numunenin kaplama üzerinde deformasyon koordinasyonu boyunca bir çizilme meydana getirmektedir. Burada oluşturulacak çizilme kaplamanın yapısal özelliklerine, oluşturulan darbe kuvveti cinsine ya da değerine ve diğer deneysel uygulama parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Darbeli-kaymanın etkiye maruz kalan elemanın yüzeyinde meydana getirdiği değişimler genel olarak Şekil 47'de gösterilmektedir. Darbe etkisi ile kaplamada pullanma, dökülme ve kayma etkisi ile plastik deformasyon oluşmaktadır. Darbeli-kayma etkisi daha iyi analiz edilebilmesi için kaplamada etkileşim bölgesinde meydana gelen değişimler belirlenmeli ve incelenmelidir.

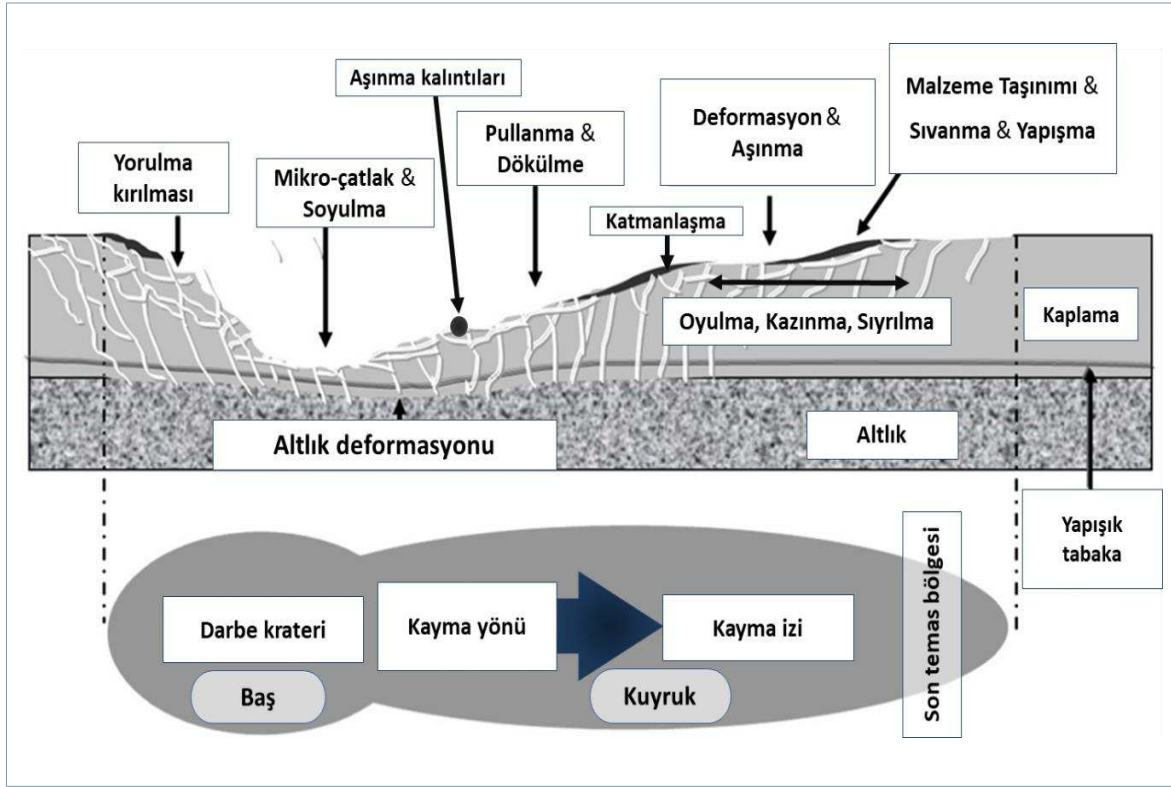


Şekil 46. Darbeli-kayma aşınma testinin şematik görünümü [80].



Şekil 47. Darbeli-kayma aşınma testinin ve oluşan temel hasarların şematik görünümü [80].

Şekil 48’de darbe-kayma etkisinin kaplamada meydana getirdiği değişimler ve oluşan aşınma mekanizmaları daha detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Bu görsel, darbeli-kayma etkisi altında test edilen bir sert kaplama işlemi uygulanmış numunenin aşınma ve deformasyon özelliklerinin genel karakteristik şeklini ifade etmektedir.



Şekil 48. Darbeli-kayma aşınma izinde oluşan aşınma hasar mekanizmaları [81].

Buna göre kaplamada oluşan aşınma izi bölgesi boyunca başlangıçta bir yorulma kırılması bölgesi mevcuttur. Aşınma izinin baş kısmında darbenin etkisi ile kaplamada meydana gelen yorulma nedeniyle mikro yorulma çatlakları oluşmaktadır. Bu mikro-çatlaklar darbe etkisinin devam etmesi durumunda gelişerek kaplama tabakasında yorulma çatlak ağları oluşturmaktadır. Yorulmanın etkisiyle meydana gelen çatlaklar kaplama tabakasından partiküllerin kopmasına neden olmaktadır. Kaplamadan kopan partiküller aşındırıcı eleman ve yüzey etkileşiminin gerçekleştiği iz boyunca araya sıkışarak kaymanın etkisi ile kuyruk kısmına doğru sürüklenmektedir. Partiküllerin etkisi abrazif aşınma mekanizması ile aşınmanın daha şiddetli hale gelmesinde önemli bir etkiye sahip olabilmekte ve aşınma izi boyunca farklı aşınma mekanizmalarının oluşumunu geliştirebilmektedir. Çizik izinin baş kısmında kuyruk kısmı tarafına doğru yorulma

kırılması bölgesinden sonra bir soyulma bölgesi oluşmaktadır. Aşınma izinin baş kısmında darbe ve ilk sürtünme kuvvetleri etkisiyle taban malzemede de genelde bir plastik deformasyon oluşmaktadır. Bütün bu etkiler sonucunda aşınma izinde oluşan aşınma mekanizmaları genellikle, kuyruk kısmına doğru kayma etkisiyle pullanma, dökülme ya da ufalanma, oyulma, sıyrılma, deformasyon & aşınma, katmanlaşma, sıvanma, yapışma ve malzeme taşınımı şeklinde kendini göstermektedir. Kaplama tabakasında aşınma izinin iç bölgelerinde temel olarak rastlanan hasar mekanizmaları pullanma ve dökülme olmaktadır [80, 81].

Darbeleri-kayma test düzenekleri ile gerçekleştirilen aşınma deneyi çalışmalarında, kaplama tabakasında meydana gelen aşınma mekanizmaları endüstriyel uygulamalarda darbeleri yüklere maruz makine elemanlarının aşınma özelliklerini temsil etmektedir. Burada belirlenen her bir hasar mekanizmasının kaplamanın aşınma performansı üzerinde önemli bir etkisi olmaktadır. Darbe ve kaymanın birlikte etkiyerek kaplama üzerinde oluşturduğu aşınma mekanizmaları, kaplamanın uygulandığı kalıp veya makine elemanının aşınma mekanizmaları sonucunda kırılarak hasara uğrama süresini belirleyici niteliktedir [81]. Bu nedenle kaplama tabakasında meydana gelen bu aşınma mekanizmalarının oluşumunun önlenmesini veya en aza indirilebilmesini sağlayacak kaplama tabakalarının geliştirilmesi, darbeleri yüklere maruz makine elemanlarının belirtilen aşınma mekanizmalarının kısa sürede ilerlemesi sonucunda kırılarak hasara uğramalarının önüne geçilebilmesini sağlayacaktır [81].

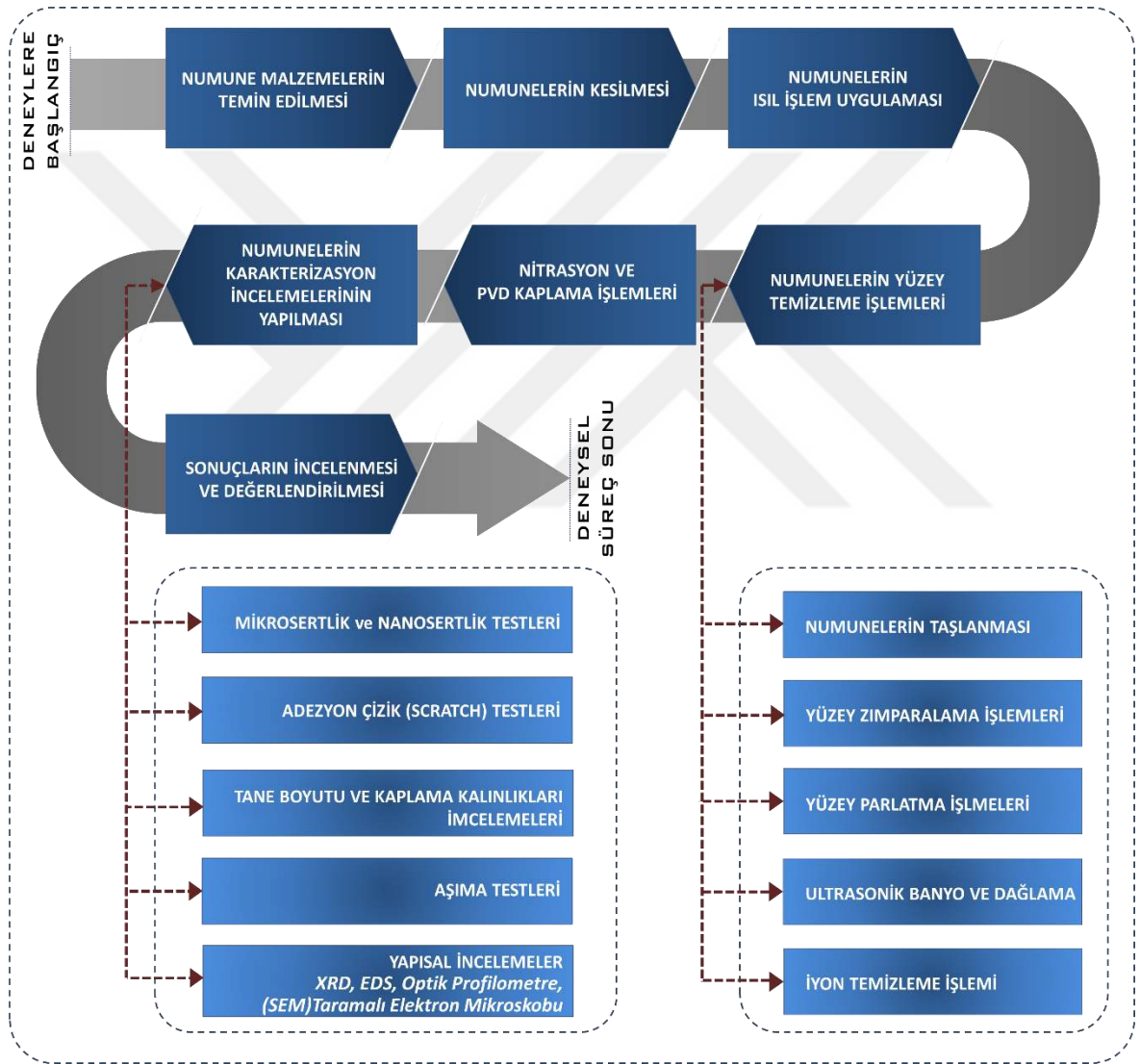
6. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Endüstriyel uygulamalarda dövme yöntemi ile üretim darbeli yüklerin etkili olduğu bir üretim alanıdır. Dövme yönteminde kullanılan kalıplar darbe ve kaymanın etkisine aynı anda maruz kalarak aşınmaktadır. Aşınma, kalıpların servis ömrünü belirleyen en önemli faktördür ve aşınarak hasara uğrayan dövme kalıplarının servis ömürleri endüstrinin beklentilerini karşılayamayıp, üretim maliyetinin artmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte aşınma hasarları daha fazla enerji ve hammadde sarfiyatı doğurmakta, hatalı ürün oluşumuna ve zaman kayıplarına neden olmakta, ek işgücü maliyetleri oluşturmakta ve bazı durumlarda iş kazalarına sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca kalıpların fonksiyon yüzeylerinde meydana gelen aşınmanın boyutsal değişime uğramalarına ve ilk yüzey kalitelerini muhafaza edememelerine neden olması, üretilen ürünlerin de boyutsal toleransını ve yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir.

Belirtilen aşınma kaynaklı bu olumsuzlukların giderilmesi için yüzeylerine TiN esaslı sert kaplama uygulanarak aşınma dayanımlarının iyileştirilmesi amaçlanan dövme kalıplarının darbe ve kayma etkisi altındaki aşınma davranışlarının belirlenmesine gerek duyulmaktadır. Dövme üretim yönteminin çalışma koşullarını tam olarak temsil edememeleri nedeniyle geleneksel yöntemlerle (pin-on-disk gibi) gerçekleştirilen aşınma deneylerinden dövme kalıplarında meydana gelen aşınma davranışı tam olarak elde edilememektedir. Bu nedenle çalışmadaki dövme kalıp malzemesi numunelerinin aşınma testleri özel olarak geliştirilip imal edilen darbeli-kayma triboloji test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen aşınma testleri sayesinde, dövme kalıp malzemesi numunelerinin tribolojik özelliklerinin belirlenmesi için darbe ve kayma etkisi altındaki aşınma davranışlarının incelenmesi ve değişken kaplama parametrelerinin, dolayısıyla kaplamaların yapısal özelliklerinin aşınma dayanımı üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda aşınma testlerinden elde edilen bulguların değerlendirilmesi sonucunda belirlenen değişken kaplama parametreleri uygulanarak TiAlZrN kaplanacak dövme kalıplarının aşınma dayanımlarının geliştirilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel sürecin belirli bir sistematik plan ile uygulanması esastır. Şekil 49’da darbeli yüklere maruz çalışan dövme kalıplarının aşınma dayanımlarının iyileştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen sistematik deneysel sürecin aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 49. Deneysel çalışma sürecinin akış şeması

Bu çalışmada, darbeli yüklere maruz kalıpların aşınma dayanımlarının geliştirilmesi amacıyla yüzeylerine farklı kaplama parametreleri ile TiAlZrN kaplama uygulanmış 9 farklı deney numunesi üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel sürecin temel

adımları; numunelerin hazırlanması, yüzeylerinin PVD yöntemi ile belirlenen kaplama bileşimi ile kaplanması, karakterizasyon deneylerinin yapılması ve sonuçların incelenerek değerlendirilmesi şeklindedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin yapısal incelemelerinden elde edilen mikrosertlik, nanosertlik, adezyon dayanımı, tane boyutu, kaplama kalınlıkları, XRD ve EDS bulguları numunelere değişken kaplama parametreleri ile uygulanan kaplamaların aşınma dayanımlarına etkileri değerlendirilmiştir. Yapısal incelemeler ve aşınma deneylerinden elde edilen bulgular değerlendirilerek en ideal aşınma dayanımını sağlayacak değişken kaplama parametreleri belirlenmiştir. Bu sayede dövme kalıplarının yüzeylerine belirlenen değişken kaplama parametreleri ile uygulanan TiAlZrN kaplama kalıpların aşınma dayanımlarının iyileştirilerek aşınma kaynaklı hasara uğramalarının önüne geçilebilecektir.

7.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında deneysel çalışmalarda kalıp malzemesi olarak kullanılan numune malzemeler DIN 1.2344 iş takım çeliğidir. DIN 1.2344 takım çeliği EN veya ISO standartlarında X40CrMoV51 olarak ve AISI standardında ise H13 olarak da gösterilmektedir. Metal enjeksiyon ve ekstrüzyon üretim yöntemi takımlarında sıklıkla kullanılan H13 takım çeliği dövme kalıpları için de standart bir çelik malzeme olarak kullanılmaktadır. H13 özellikle ısıtıl işlem ve nitrasyon işlemine uygun bir takım çeliği özelliğindedir. H13 malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir [82, 83].

Tablo 1. DIN 1.2344 takım çeliğinin özellikleri [84, 85]

DIN 1.2344 Çeliğin Kimyasal Özellikleri							
(%) C	(%) Si	(%) Mn	(%) P	(%) S	(%) Cr	(%) Mo	(%) V
0,37 - 0,43	0,90 – 1,20	0,30 – 0,50	maksimum 0,025	maksimum 0,005	4,80 – 5,50	1,20 – 1,50	0,90 – 1,10

DIN 1.2344 Çeliğin Isıl İşlem Bilgileri				
Gerilim Giderme Sıcaklığı (°C)	Sertleştirme		Meneviş Sıcaklığı (°C)	Sertlik (HRC)
	Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Sertlik (HRC)		
600 – 650	1020 – 1080	Yağda	500 – 575	50 – 55
		52 – 56		

Deneysel çalışmalar için numune olarak kullanılacak olan her bir numunenin ölçüleri 30 mm çap ve 4 mm kalınlık olarak belirlenmiştir. DIN 1.2344 takım çelik malzemesi gerekli numune sayısının elde edilmesini sağlayacak miktarda satın alınmıştır. Satın alınan çelik malzeme, yüzey hazırlama işlemleri öncesinde belirlenen 30 mm çap ve 4 mm kalınlık boyutlarında kesilmiştir. Bu işlem sonucunda numunelerin işlem görmemiş ilk halleri elde edilmiştir. Disk şeklindeki numuneler sonrasında literatüre uygun olarak bazı ısıtma işlemlere tabi tutulmuştur. Numuneler, 650 °C’de gerilme giderme tavlmasına tabii tutulduktan sonra, 1030 °C’de yağda soğutulularak sertleştirilmiştir. Ardından sırayla 500 ve 575 °C’de tekrarlı olarak menevişleme işlemine tabi tutularak numunelerde ortalama 54 HRC sertlik değeri elde edilmiştir. Bu işlemlerden sonra, numunelere 530 °C sıcaklık seviyesinde tekrar bir gerilme giderme işlemi uygulanmıştır. Belirtilen ısıtma işlemlerin uygulandığı süreç sonrasında numunelerin yüzeylerine taşlama ve kaba zımparalama uygulanmıştır [84, 85].

7.2. Numunelerin Nitrürleme İşlemi

Nitrürleme işlemi, azotun (N_2) ferrit fazındaki demir içine difüzyonu (yayınımı) ile malzeme yüzeylerindeki mikroyapı içinde metal-nitrür bileşiklerinin bulunduğu sert bir yüzey tabakası elde edilmesini sağlayan termo-kimyasal bir yüzey işlemi olarak tanımlanmaktadır. Çelik malzemelerin yorulma ve aşınma dayanımlarının geliştirilmesi ve yüzey sertliklerinin artırılmasında etkili bir yöntemdir. Nitrürleme işleminin diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre önemli bir avantajı 500-590 °C gibi düşük işlem sıcaklıklarında gerçekleştirilebilmesidir. Bu sıcaklık aralığında işlem boyunca, malzeme içerisinde ferritten-ostenite veya ostenitten-martenzite herhangi bir faz değişimi olmamaktadır. Dolayısıyla malzemenin faz yapısında herhangi bir değişim olmadığı için kafes yapısında da herhangi bir değişim meydana gelmemektedir. Düşük işlem sıcaklığında uygulanma olanağına sahip olması ve yüksek soğutma hızları gerektirmemesinden dolayı, nitrürleme işlemine tabi tutulan malzemelerde çarpılma (distorsiyon) minimum seviyelerde meydana gelmektedir. Aynı zamanda, nitrürleme işleminin uygulandığı sürede moleküler anlamda herhangi bir boyut değişimi olmamaktadır ve yalnızca azot difüzyonundan dolayı çelik yüzeyinde yoğunluk değişimi ile birlikte çok küçük bir büyüme görüldüğü söylenebilir [9, 86, 87].

Yüzeylerine uygulanacak kaplama işlemi öncesi metalografik olarak hazırlanan DIN 1.2344 çelik numunelerin nitrürleme işlemleri 525 °C’de 8 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Gaz nitrürleme yönteminde sertleştirilecek olan parçanın üzerine 510 °C sıcaklıkta amonyak

akışı sağlanmaktadır. Gaz nitrürleme yönteminde akışı gerçekleştirilen amonyak aşağıdaki (1) numaralı eşitlikte olduğu gibi ayrıştırılmaktadır. Kimyasal reaksiyon sonucunda atomik olarak ayrılan azot (2) numaralı eşitlikte verildiği gibi kimyasal reaksiyonla çelik tarafından absorbe edilmektedir. Çelik malzeme yüzeylerinin nitrülenmesi verilen eşitliklerdeki reaksiyonların tekrarlanmasıyla gerçekleştirilmektedir [86, 87].



Nitrürleme işleminden sonra DIN 1.2344 çelik numunenin farklı bölge ve derinliklerde belirlenen sertlik değerleri aşağıdaki gibidir.

Beyaz tabaka kalınlığı	: 5-6 μm
Çekirdek sertliği	: 640-660 HV
0,1mm derinlikte sertlik	: 1080 HV
0,2 mm derinlikte sertlik	: 722 HV
0,3mm derinlikte sertlik	: 660 HV

Nitrürleme işlemine tabi tutulan numunelerin yüzeylerine kaplama işlemi öncesinde zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Numunelerin yüzeylerinin belirli bir yüzey pürüzlülüğüne getirilmesi amacıyla numunelerin yüzeyleri sırasıyla 220-400-600-800-1000-1200-1500-2000 numaralı zımparalar ile tek tek zımparalanarak hazırlanmıştır. Zımparalanan numuneler Alümina (Al_2O_3) solüsyon kullanılarak döner disk üzerine sabitlenen bir parlatma keçesi üzerinde son yüzey parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan bu işlemler neticesinde hazırlanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ortalama olarak $0,05\mu\text{m}\pm 0,002$ olarak ölçülmüştür. Numunelerin yüzeyleri her zımparalama aşamasından sonra ve parlatma işlemi sonrasında alkol ile temizlenmiş ve ardında bir fön kurutma makinesi ile kurutularak özel küçük numune poşetlerine yerleştirilmiştir.

7.3. Kaplama İşleminde Uygulanan Yöntem

Gerçekleştirilen çalışmalarda daha önce pim-disk aşınma deneyleri yapılarak aşınma dayanımının artırılmasında başarılı sonuçların elde edilmesi göz önünde bulundurularak ve yapılan literatür araştırmalarına göre belirlenen TiAlZrN kaplama bileşiminin DIN 1.2344

takım çelik numune yüzeylerine kaplanması işlemi DC kapalı-alan dengesiz manyetik alanda PVD sıçratma yöntemi ile uygulanmıştır. Çalışmada literatür araştırmaları kısmında da belirtildiği gibi bu yöntemde 4 adet mıknatıs kullanılarak oluşturulan kapalı manyetik alan sayesinde kaplama işlemi için ortama yerleştirilen numunelerin bulunduğu plazmanın manyetik sınırlar dışına çıkması engellenmekte ve hedef malzemelerden sıçratılan atomların numune yüzeylerine daha iyi nüfuz etmesi sağlanmaktadır. Kullanılan sistemin dengesiz olması mıknatıslardan uzakta kalan alanda plazma oluşumunu sağlamaktadır. Belirtilen bu sistemin kullanımını avantajlı yapan en önemli etkenlerden biri, bu yöntem ile uygulanan kaplama işleminde numune yüzeylerinde yük birikmesinden kaynaklanan ark oluşumunun mümkün olduğunca az olmasıdır. Ark oluşumunun az olması, kaplamaların daha homojen ve kararlı bir yapıda olmasını sağlamaktadır. Bir diğer önemli etken ise, olumsuz bir durum olan hedef malzeme zehirlenmesinin düşük olmasıdır. Yöntemin sağladığı diğer önemli avantajlar ise; kademeli kaplamaların üretilmesine olanak sağlayarak taban malzeme ile kaplama arasındaki adezyon direncini artırması, taban malzemenin ısınmasının daha düşük olması, plazmayı hedef malzeme yüzeyine hapsetmesi sayesinde iyonlaşma verimliliğinin daha iyi olması, 50-250 kHz gibi düşük frekanslarda çalışabilmesi şeklinde sıralanabilmektedir [9, 27, 88].

7.4. Kaplama İşleminde Deneysel Tasarım

Bu çalışmada incelenen numunelerin yapısal özellikleri ve tribolojik karakterleri gerçekleştirilen kaplama işlemindeki kaplama yapıları ile ilişkilidir. İşlem sürecindeki bias gerilimi, çalışma basıncı, hedef malzeme akımı, taban malzeme sıcaklığı, hedef ve taban malzemenin yerleştirilme şekli ve yeri, işlem zamanı, frekans, taban malzeme ile hedef malzeme arasındaki mesafe gibi kaplama parametrelerine bağlı olarak kaplama yapıları değişkenlik göstermektedir. Belirtilen bu parametrelerin her biri kaplama özelliklerini etkilemektedir ve her bir parametre birbiri ile etkileşime sahip olarak kaplama özelliklerinde belirleyici bir faktör olmaktadır [89].

Kaplama parametrelerinin birinin ya da bazılarının değişken olarak belirlenip diğer parametrelerin sabit tutulmasıyla değişken parametrelerin kaplama özelliğine etkisinin tespit edilebilmesini amaçlayan yöntem kullanılan geleneksel yöntemdir. Burada amaç doğrultusunda belirtmek gerekir ki, ideal bir kaplama tabakası özelliğinin tespit edilebilmesi, birçok parametrenin bütün varyasyonlarının denenmesi ile mümkün olabilecektir. Bu durum

ise hem maliyetlidir hem de uzun bir zaman gerektirecektir. Bu doğrultuda geliştirilen deneysel tasarım yöntemleri sayesinde birçok değişkenin optimum kombinasyonunun sağlanması ile karmaşık olan işlemlerin optimize edilmesi gerçekleştirilebilmektedir [90].

Değişken parametreler kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Sinyal/Gürültü (S/N) oranları hesaplanarak incelenen Taguchi yöntemi en çok bilinen deneysel tasarım yöntemidir. Taguchi yönteminde sinyal ölçülmek istenen değeri, gürültü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin etkisini ifade etmektedir. S/N grafikleri ile bir değişken parametrenin kaplama özelliğinde etkili bir parametre olup olmadığı değerlendirilmektedir. Aynı zamanda değişken parametrelerin etki derecesi S/N oranlarının delta istatistiğine göre hesaplanmaktadır. Delta istatistiği aynı seviyenin S/N ortalamalarının en büyüğünün en küçüğünden çıkarılması ile hesaplanmaktadır. Taguchi deney tasarım yönteminde S/N oranları, daha küçük daha iyi, daha yüksek daha iyi ve nominal değer daha iyi şeklinde değerlendirilmeye alındığı 3 ayrı ölçüte göre analiz edilmektedir [91].

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneyde $L_9 (3^3)$ ortogonal dizin tasarımı kullanılmıştır. Kaplama özelliklerine etki eden parametrelerin önemlilik seviyeleri ANOVA analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan değişken parametreler; çalışma basıncı, bias gerilimi ve kaplama malzemesi Zirkonyum (Zr) elementinin hedef akımı olarak seçilmiştir. Literatür incelemelerinden anlaşıldığı üzere, bias geriliminin kaplama tabakasının yüzey morfolojisine, kalınlığına ve tribolojik özelliklerine önemli oranda etkileri olmaktadır. Yüzey morfolojisi, kaplama üzerine çarpan yüksek enerjili iyon ve atomlardan etkilenmektedir. Literatürde, artan bias gerilimi ile kaplama kalınlığının azaldığı gözlemlenmiştir. Diğer bir taraftan ise bias gerilimi arttığında serbest halde dolaşan iyonların kinetik enerjileri artmaktadır ve bu sayede kinetik enerjisi artan iyonlar taban malzeme yüzeyine çarptığında daha yüksek bir kinetik enerjinin yüzeye transferini gerçekleştirmektedirler. Kinetik enerjilerini transfer eden atomlar daha düşük enerjili yerlere yerleşmektedir ve bu sayede kaplama tabakasını daha kararlı ve düzenli bir şekilde oluşturmaktadır. Yüzeye yerleşen atomların ileri ve geri hareket kabiliyetleri sayesinde kaplama tabakası daha yoğun ve boşluksuz büyümektedir [9].

Bu çalışmada PVD kaplama işleminde hedef malzeme olarak Ti, Al, Zr elementleri ve reaktif gaz olarak da azot kullanılmıştır. Literatür bulguları göstermektedir ki, TiN bazlı kaplamalara Al ilavesi kaplamanın sürtünme katsayısını düşürmektedir. Ayrıca Al elementi sayesinde yüzeyde oluşan Al_2O_3 yapısı kaplamanın oksitlenme sıcaklığını yükselttiği tespit edilmiştir. Sağladığı yüksek termal ve kimyasal kararlılık, iyi aşınma direnci, yüksek sertlik,

yüksek elektrik iletkenliği sayesinde kaplama tabakasına ilave edilen Zr elementi ile elde edilen ZrN bileşimi son zamanlarda tercih edilen bir kaplama bileşimi elementi olarak ön plana çıkmaktadır [92, 93].

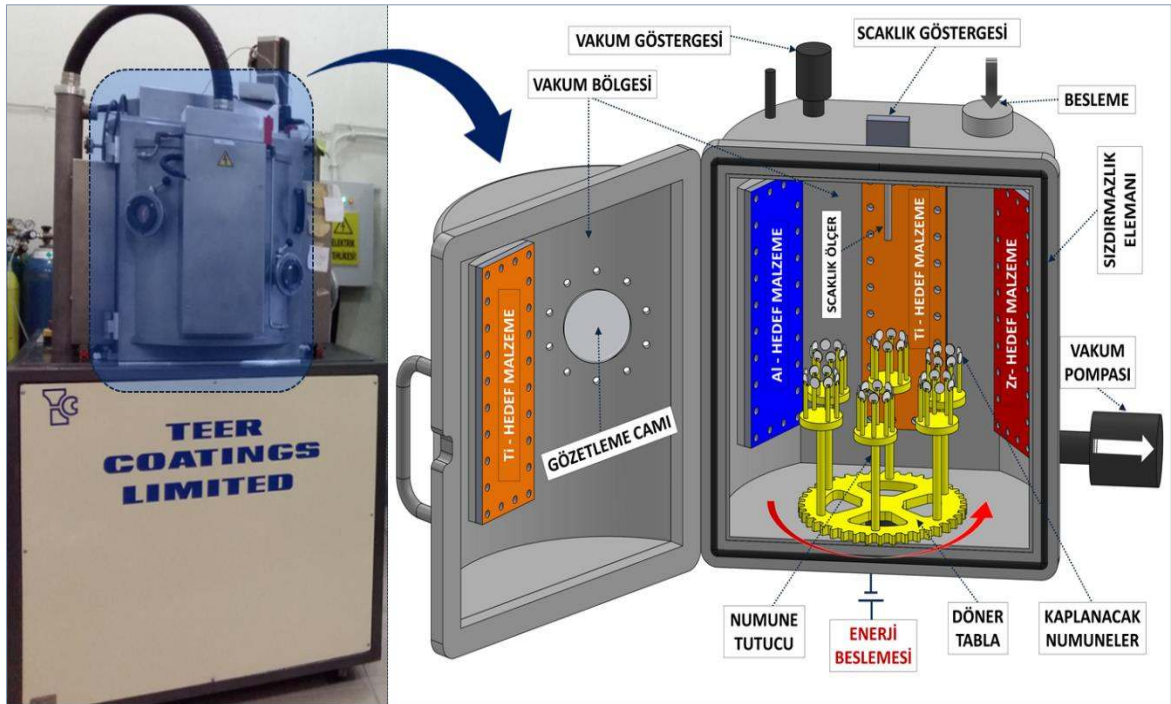
Bu bilgiler ışığında üretimi gerçekleştirilecek olan TiAlZrN bileşimi ile yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı, yüksek sıcaklıkta termal kararlılık ve yüksek aşınma direnci elde edilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca TiAlZrN bileşimli kaplamaların geleneksel yöntemler ile gerçekleştirilen aşınma testlerinden elde edilen bulgulara göre kaplamanın taban malzemenin tribolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği bilindiğinden aynı şekilde darbeli yüklemelerin etkisi altında iyi bir aşınma dayanımı elde edilmesi amaçlanmaktadır.

7.5. Kaplama İşlemi Uygulaması

Numunelerin belirlenen kaplama uygulamasının gerçekleştirileceği ekipmana yerleştirilmesinden önce ekipmanın içerisi diğer geçmiş kaplama işleminden kalan kalıntıların ve diğer kirlerin giderilmesi için zımparalanarak ve alkol ile silinerek ayrıntılı bir şekilde temizlenmiştir. Çalışmada gerçekleştirilecek olan kaplama işlemi için gerekli olan 3 farklı kaplama hedef malzemesi gerekmektedir. Gerekli olan bu hedef malzemeler sistemin kaplama işleminin gerçekleştirileceği bölümüne iki adet Titanyum, bir adet Alüminyum ve bir adet Zirkonyum hedef plaka malzemesi yerleştirilmiştir. Numuneler kaplama işlemi öncesi dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Sonrasında PVD kaplama ekipmanı içerisinde döner tabla üzerindeki tutamaçlara bağlanan numunelerin öncelikle kaplama işlemi öncesinde yüzeylerinde olabilecek muhtemel kirlilikleri temizlemek amacıyla 15 dakika süreyle iyon temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. İyon temizleme için argon soy gaz atmosferi kullanılmıştır. İyon temizleme işleminden sonra kaplama ile taban malzeme arasındaki adezyonu kuvvetlendirmek, oksitlenme direncini artırmak ve film taban malzeme ara yüzünde oluşacak artık gerilmeleri azaltmak amacıyla 5 dakika süreyle Ti ara tabakası kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından çalışma için belirlenen dereceli (graded) kaplama işlemi kapalı-alan dengesiz manyetik alan içerisinde uygulanmaya geçilmiştir. Yüksek sıcaklık nedeniyle biriken ısı gerilmeleri azaltmak amacıyla, 15 dakika boyunca TiN, 20 dakika boyunca TiAlN ve 20 dakika boyunca TiAlZrN tabakaları numune yüzeyine kaplanmıştır. Bu kaplama işlemleri sırasında, kaplama işlemi için ekipman içerisine yerleştirilmiş olan DIN 1.2344 numunelerle birlikte aynı ortama yapısal

incelemelerde kullanılmak üzere cam levha altlıklar yerleştirilmiş ve aynı kaplamanın bu altlıklara da biriktirilmesi sağlanmıştır.

Sistemin çalışma prensibine göre önce vakumlama işlemi, sonra sıçratma yöntemi ile kaplama, sonrasında vakum boşaltma ve soğumaya bırakılması süreçleri gerçekleştirilmiştir. Sistemdeki kaplama ortamının ve numunelerin sıcaklığı istenilen değerlere düştüğünde numuneler sistemden alınmıştır [53]. PVD kaplama işleminin uygulandığı sistem Şekil 50’de gösterilmektedir.



Şekil 50. PVD kaplama işleminin gerçekleştirildiği ekipman [88].

Kaplama işleminin gerçekleştirildiği sistem genel olarak kaplama işlemi uygulama ekipmanı, kontrol- enerji ünitesi ve kontrol ekranı bölümlerinden oluşmaktadır. Sistemin kaplama işlemi sürecindeki uygulama parametreleri hem ünite üzerinden hem de kontrol ekranından işlenebilmekte ve gerekli değerler kontrol edilebilmektedir. Kaplama işlemi uygulama ekipmanı içerisinde iki adet Ti elementi hedef malzemesi karşılıklı olarak, Al ve Zr elementi hedef malzemeleri de karşılıklı olarak bir daire üzerinde çevresel olarak yerleştirilmiştir. Kaplama işlemi uygulanacak olan yüzeyleri kaplama işlemine hazırlanmış taban malzemeler ise döner alt tabla üzerindeki tutamaçlara sabitlenmiştir. Taban malzemelerin kaplanacak yüzeyleri hedef malzemeler tarafına bakacak şekilde bağlanarak

kaplama veriminin artırılması amaçlanmıştır. Uygulanan PVD kaplama işlemindeki kaplama parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Optimum değişken kaplama parametreleri; bias gerilim değeri: 75V, Zr hedef malzeme akımı: 3A ve çalışma basıncı: $2,5 \times 10^{-3}$ Torr olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. TiAlZrN kaplama tabakasının PVD uygulama parametreleri

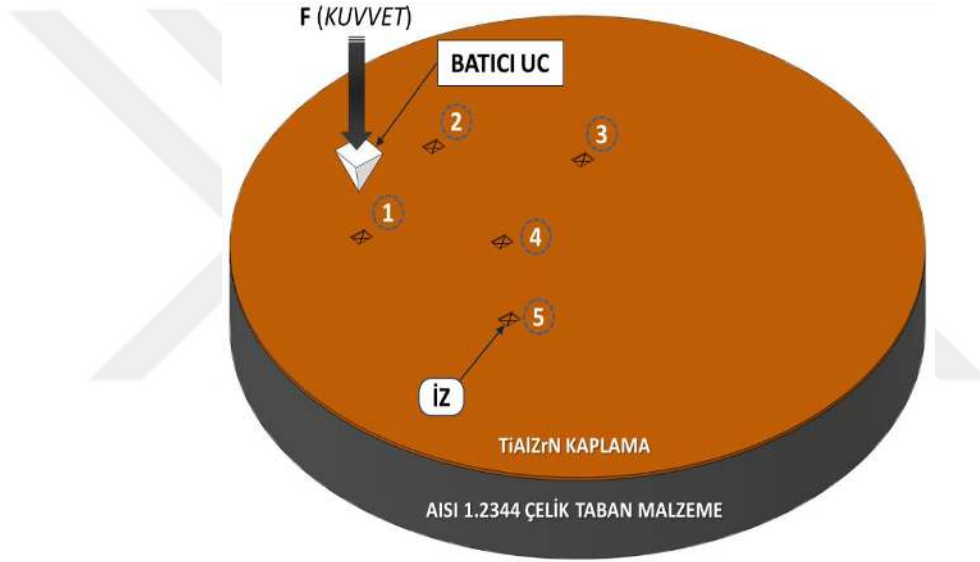
DEĞİŞKEN PARAMETRELER			SEVİYELER		
			1	2	3
Zr Hedef Malzeme Akımı	PARAMETRE BİRİMLERİ	(A)	2	3	5
Bias Gerilimi (Taban Malzeme Gerilimi)		(V)	50	75	90
Çalışma Basıncı		(Torr)	2×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-3}$	3×10^{-3}

SABİT PARAMETRELER		
Hedef Akımları; Ti / Al	PARAMETRE BİRİMLERİ	(A)
Ara Tabaka için Ti Hedef Akımı		(A)
Kaplama Süresi		(dak.)
Frekans		(kHz)
Görev Zamanı		(μs)
		6 / 2
		6
		60
		100
		2,5

Numune Adı	Zr Hedef Akımı (A)	Bias Gerilimi (V)	Çalışma Basıncı (Torr)
R1	2	50	2×10^{-3}
R2	3	50	$2,5 \times 10^{-3}$
R3	5	50	3×10^{-3}
R4	3	75	2×10^{-3}
R5	5	75	$2,5 \times 10^{-3}$
R6	2	75	3×10^{-3}
R7	5	90	2×10^{-3}
R8	2	90	$2,5 \times 10^{-3}$
R9	3	90	3×10^{-3}

7.6. Mikrosertlik Testleri

TiAlZrN kaplama tabakasının mikrosertlik değeri, her bir numune yüzeyinden 5 farklı noktadan 50 gr yük altında 10 sn süreyle elde edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde kullanılan ucun yüzeye batma miktarının kaplamanın kalınlığının yarısından daha düşük olması garanti edilerek taban malzeme sertliğinin etkisi ihmal edilmeye çalışılmıştır. Numunelerin mikrosertlik değeri, numune yüzeyinden ölçülen 5 farklı noktadaki sertlik değerlerinin ortalama değeridir. Mikrosertlik ölçümlerinin şematik gösterimi Şekil 51’de gösterilmektedir.



Şekil 51. Numunelerin mikrosertlik ölçümü

$$\text{Ortalama Sertlik Değeri} = \frac{(\text{Sertlik: 1} + \text{Sertlik: 2} + \text{Sertlik: 3} + \text{Sertlik: 4} + \text{Sertlik: 5})}{5}$$

Mikrosertlik testleri neticesinde belirlenen ortalama sertlik değeri yukarıda verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır. Bu sayede numunelerin sahip oldukları mikrosertlik değerlerinin daha az hata ile belirlenmesi sağlanmış olmaktadır. Numunelerin mikrosertlik testleri KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Bilimi Laboratuvarında Struers Duramin (Danimarka) marka Vickers tipi mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

7.7. Nanosertlik Testleri

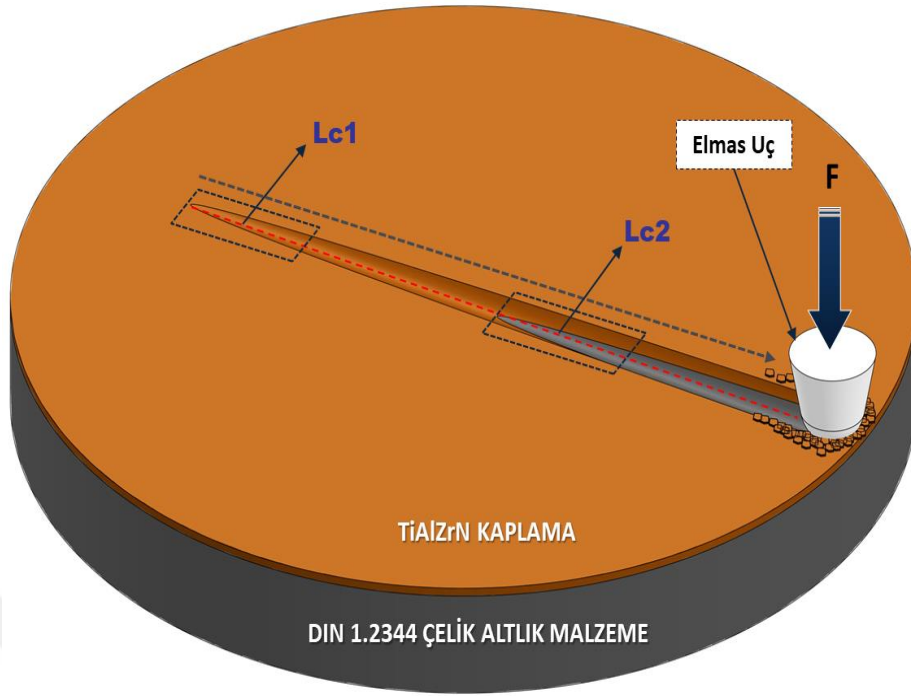
Numunelerin nanosertlik ölçümleri, numune yüzeyine belirli bir kuvvetle iz bırakan sert uç ile gerçekleştirilmektedir. Nanosertlik testinde numune yüzeyinde nano-iz oluşturulması yönteminde küçük yüklemeler ve küçük boyutta batıcı uçlar kullanılır. Nanosertlik testinde iz oluşturulan alan birkaç mikrometrekare ya da nanometre olabilir. Batıcı ucun kaplama tabakasına batırılması sonucunda oluşan maksimum derinlik, elastik geri tepme derinliği ve temas girinti derinliği değerleri, kaplama tabakasının nanosertlik değerlerinde belirleyici özelliğe sahip olmaktadır. Kullanılan bu yöntemde, iz oluşturma işlemi esnasında izin derinliği kaydedilir ve izin alanı ucun geometrisi kullanılarak tespit edilir. Böylece belirlenen bu izler kullanılarak numunelerin kaplama tabakalarının nanosertlik değerleri belirlenir. Gerçekleştirilen nanosertlik testleri sonucunda numunelerin elde edilen nanosertlik değerleri grafik olarak verilmiştir.

7.8. Yapısal İncelemeler

Cam altlık üzerine biriktirilmiş kaplama tabakalı özel numunelerin yapısal incelemeleri, $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip $\text{CuK}\alpha$ radyasyon kaynaklı X-Ray Difraktometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune, $2\theta=5-100^\circ$ tarama aralığı, 3 derece/dakika tarama hızı ve 0,05 derece tarama adım değerlerinde incelenmiştir. Kaplamadan elde edilen X-Ray grafikleri literatür incelemeleri sonucunda değerlendirilmiştir. Kaplamaların kimyasal bileşimleri ise EDS analizi kullanılarak karakterize edilmiştir. Kaplama tabakalarının mikroyapı özellikleri, yüzey görüntüleri, kalınlıkları ve aşınma testinden elde edilen aşınma izi görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile sağlanmıştır. SEM görüntüleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Laboratuvarlarında mevcut olan Zeiss marka SEM cihazı ile elde edilmiştir.

7.9. Adezyon (Çizik) Testi Deneyleri

Numunelere uygulanan kaplama tabakalarının adezyon dayanımları çizik testi ile belirlenmiştir. Adezyon dayanımlarının belirlenmesinde çizik testi yöntemi en etkili yöntemlerden biri olarak ön plana çıkmaktadır. Çizik testi uygulamasının şematik gösterimi Şekil 52’de gösterildiği gibidir.



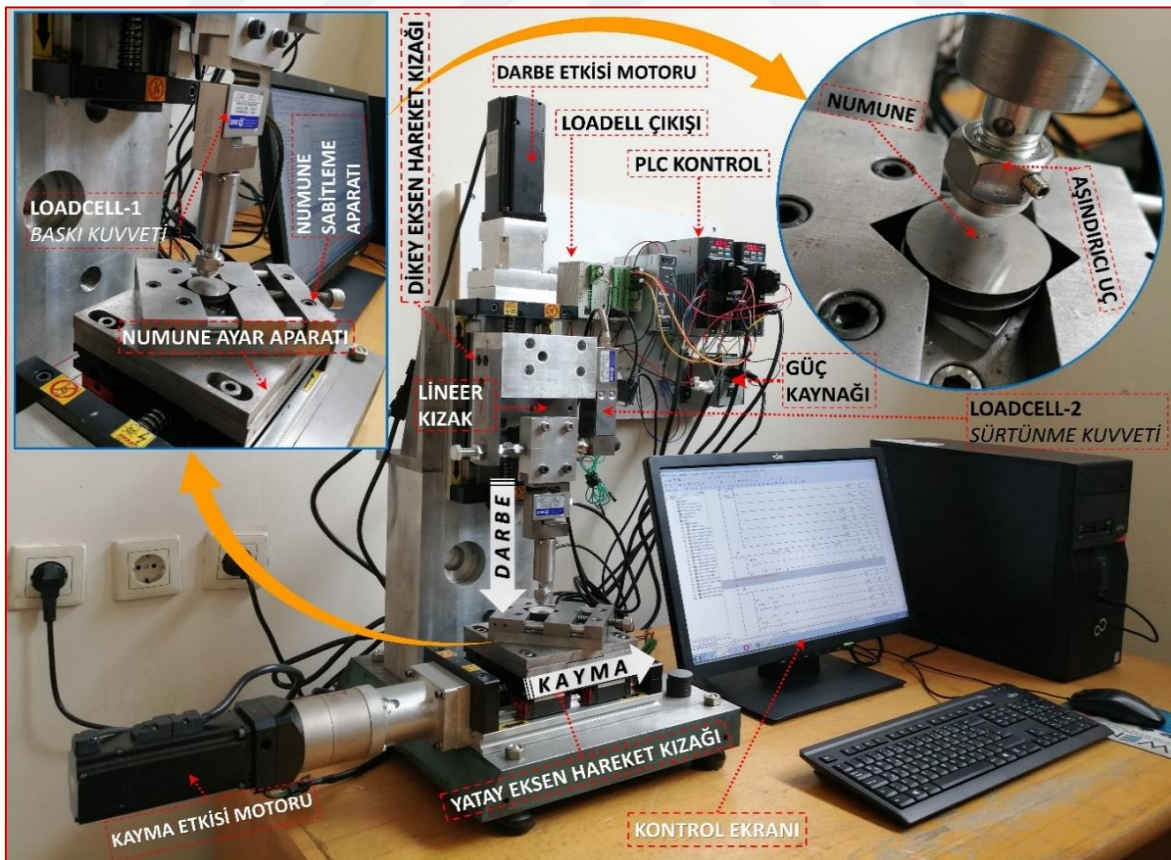
Şekil 52. Adezyon (çizik) deneyi uygulamasının şematik görünümü

TiAlZrN kaplama tabakasının taban malzeme yüzeyine yapışma dayanımı, CSM firması tarafından üretilmiş olan Revester model çizik (scratch) test cihazı ile belirlenmiştir. Deney parametreleri; 10 mm/dk kayma hızı, başlangıçtan 100 N/dk'ya kadar yükseltilecek yük değeri olarak kullanılmıştır. Ölçümler için çapı 200 μm olan standart Rocwell-C tipi sert uç kullanılmıştır. Kaplamaların adezyon dayanımlarının belirlenmesinde çizik testi esnasında kaplama tabakasında hasarın ilk olarak belirdiği yük değerinin belirlenmesi ile gerçekleştirilmektedir.

L_{c1} kritik yükü; kaplamanın ilk pullanarak koptuğu yük değeridir. L_{c2} kritik yükü; kaplamanın taban malzemeden soyulmaya başladığı yük değeridir. Şekil 52'de gösterildiği şekilde, çizik testi ile elde edilen çizik boyunca işaretlenen L_{c1} bölgesinde meydana gelen çizikte kaplama malzemesi tamamen taban malzeme üzerinden kalkmamışken L_{c2} bölgesinde kaplama tabakası çizik boyunca taban malzeme üzerinden kalkmış ve taban malzeme seviyesine ulaşılmış olduğu görülmektedir. Adezyon testleri ile oluşturulan çizikler boyunca kaplama tabakasında meydana gelen değişimler kaplama tabakasının yapışma dayanımı hakkında bir değerlendirme yapılması için önemli veriler olmaktadır. L_{c2} bölgesinde meydana gelen aşınma kaplama tabakasının adezyon dayanımı hakkında esas bilgiyi teşkil etmektedir [94]. Bu bilgiler ışığında çizik testlerinden elde edilen izlerin SEM görüntüleri incelenerek karakterize edilmiştir.

7.10. Aşınma Testleri

Taban malzemenin ve üretilen TiAlZrN kaplamalı numunelerin aşınma davranışları, dövme işlemlerinde kullanılan kalıpların çalışma sistematığı dikkate alınarak uygulama şartlarını temsil edecek şekilde tarafımızca tasarlanan Şekil 53'te verilen darbeli-kayma esasına dayanan aşınma test düzeneği kullanılarak belirlenmiştir. Dövme işleminin çalışma şartlarını yansıtan test düzeneği sayesinde dövme kalıplarında oluşan darbe kuvvetleri ve kayma etkisi en doğru şekilde temsil edilmiş olunacaktır. Deneysel çalışmalarda numuneler üzerinde tek yönlü darbeli-kayma aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Uygulama esnasında sıcaklık ve nem gibi deneysel çalışmaların uygulama ortamı koşulları çalışmanın sonuçlarını etkileyeceği için belirlenmiş ve çalışma verilerinde parametre olarak belirtilmiştir. Aynı zamanda aşınma karakterini belirleyici nitelikte olan aşındırıcı bilye özellikleri ve boyutu, uygulanan yük değeri, deney süresi, çevrim sayısı ve hız birer parametre olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler ile gerçekleştirilen darbeli aşınma testlerinde uygulanan darbe yük değeri sistemdeki loadcell (yük hücresi) sayesinde belirlenmektedir.



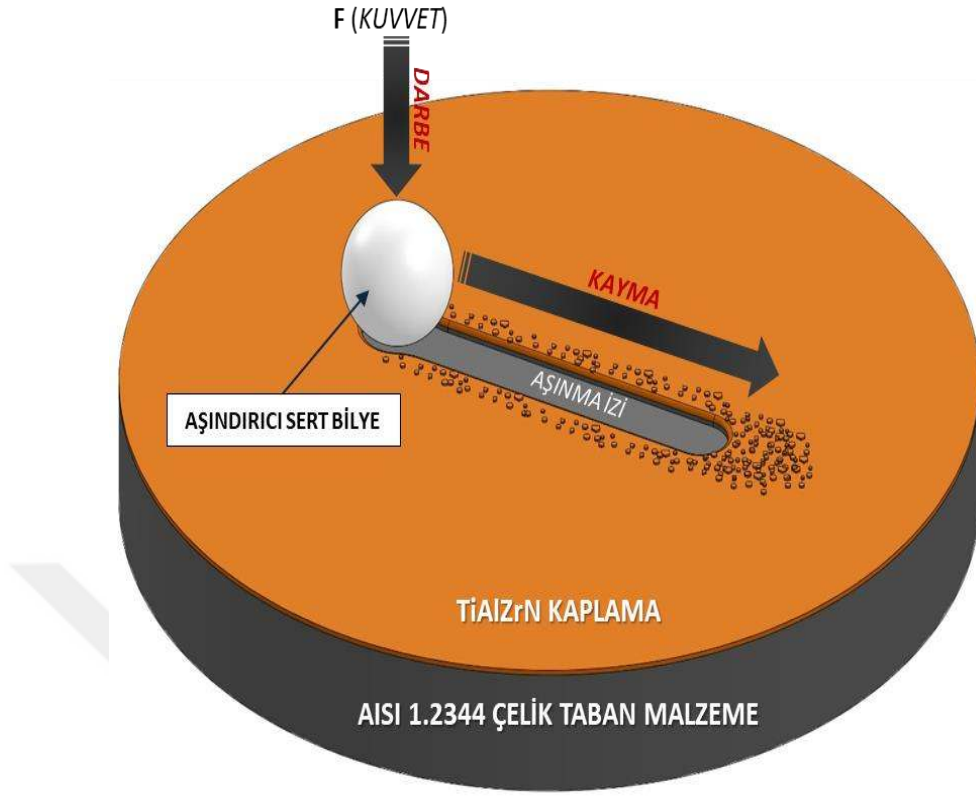
Şekil 53. Darbeli-kayma aşınma testlerinin gerçekleştirildiği deney düzeneği

TiAlZrN kaplanan 9 farklı dövme kalıp malzemesi numunelerinin ve H13 taban malzeme numunesinin uygulanan darbeli-kayma aşınma test parametreleri Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 3. Darbeli-kayma aşınma deneyinin uygulama parametreleri

SABİT PARAMETRELER	ÖZELLİK / DEĞER
Uygulanan Kuvvet	10 N
Aşındırıcı Bilye Özelliği	Al ₂ O ₃
Aşındırıcı Bilye Çapı	10 mm
Deney Uygulama Süresi	40 dk
Çevrim Sayısı	500 çevrim
Dikey Motor (Darbe Etkisi) Hızı (Darbe Etkisi Yüğü Uygulama Hızı)	3 mm/s
Yatay Motor (Kayma Etkisi) Hızı (Darbe Etkisi Yüğü Uygulama Hızı)	5 mm/s
Test Ortamı	Atmosfer ortamı
Ortam Sıcaklığı	18-22 °C
Bağıl Nem	% 50-60

Darbeli-aşınma testlerinden yukarıda verilen belirlenmiş test parametreleri doğrultusunda numuneler üzerinde Şekil 54'teki aşınma izleri elde edilmektedir. Buna göre darbeli-aşınma test cihazında aşınma deneyleri esnasında deney numuneleri yüzeylerine uygulanan darbeli yük 10 N'dir. Farklı kaplama parametresi ile kaplanan 9 farklı deney numunesi ve işlemsiz taban malzeme üzerine eşit miktarda yük uygulanmıştır. Her bir numune üzerinde oluşturulan aşınma izleri 500 döngü olarak belirlenmiştir. 500 döngünün uygulanma süresi 40 dakikadır.



Şekil 54. Numunelerin darbeli-kayma aşınma izi

Aşındırıcı yüzey olarak 10 mm çapındaki Al_2O_3 aşındırıcı sert bilye kullanılmıştır. Bilyenin darbeli-kayma aşınma deneyi esnasında numune yüzeyi ile temas noktası her bir numune döngüsünde değiştirilerek test döngüleri uygulanmıştır. Deneyler değişmeyen atmosfer ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı 18-22 °C arasında sabit bir değerdedir ve ortamın bağıl nemi % 50-60 ortalama değerlerinde sabit kalmaktadır.

Deneyler sonucunda elde edilen Şekil 54'teki aşınma izleri kullanılarak; numuneler üzerinde meydana gelen aşınma hacimleri, KTÜ Makina Mühendisliği Malzeme Bilimleri Laboratuvarında bulunan temassız optik profilometre yardımıyla ölçülmüştür. Oluşan aşınma izlerinin görselleri ve grafikler birlikte verilmiştir. Oluşan aşınma mekanizmaları ise numune yüzeyindeki aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskopunda incelenmesiyle karakterize edilmiştir. Darbeli-kayma aşınma deneyleri ile meydana gelen aşınma izi detay görüntüleri üzerinden aşınma izi yapısı ve meydana gelen etkiler belirlenmiştir. Aşınma izi boyunca darbe bölgesi ve kayma bölgesi boyunca oluşan aşınma mekanizmaları SEM görüntüleri üzerinde ayrı ayrı karakterize edilerek açıklanmıştır.

Darbeli-kayma etkisi altında elde edilen sonuçlar işlemsiz taban malzeme üzerinde oluşan aşınma izleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak farklı numunelere uygulanan kaplama tabakalarının darbeli-kayma etkisi altında taban malzemeye kazandırdığı aşınma dayanımının göreceli olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda aynı zamanda, aynı kaplama parametreleri ve aynı kaplama tabakası ile kaplanmış numuneler üzerinde literatürde daha önce gerçekleştirilmiş geleneksel aşınma deneylerinden elde edilen aşınma karakterleri ile darbeli yükler altında bu çalışma neticesinde elde edilen aşınma dayanımlarının karşılıklı kıyaslanma imkânı sağlanacaktır. Darbeli-kayma aşınma testlerinden elde edilen veriler temel olarak; kaplama tabakasının taban malzemeye kazandırdığı aşınma dayanımı, oksitlenme özellikleri, kararlı aşınma bölgelerinin oluşmasına kadar süren aşınma davranış grafikleri, aşınma izlerinde oluşan farklı aşınma bölgelerin yapıları ve aşınma izlerinde meydana gelmiş olan hasarların belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu sayede esas olarak darbenin aşınma üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve endüstride darbe etkisi altında çalışan dövme kalıplarının yüzeylerine uygulanmak üzere aşınma dayanımını artıracak kaplama tabakası geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bununla birlikte literatürde konu hakkındaki bilgi birikiminin güçlendirilmesi amacıyla elde edilen bütün bulgular değerlendirilerek konu üzerine yapılabilecek gelecek benzer çalışmalara faydalı olması açısından literatüre kazandırılması önem arz etmektedir.

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

Son yıllarda darbeli yüklere maruz makine parçalarının tribolojik özelliklerini yüksek kalitelere çıkarmak amacıyla farklı sert kaplamalar üzerine bilimsel araştırmalar ve test çalışmaları sürdürülmektedir. Bu alanda kaplama teknolojilerinin tarihsel gelişiminde ilk olarak CVD teknikleri gelişmiş, daha sonrasında PVD yöntemleri geliştirilmiştir. Günümüzde, kaplama çeşitlerinin avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurularak hem tek katmanlı hem de çok katmanlı tekniklerin ikisi de kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık uygulamalarında tek katlı nitrür esaslı kaplamalara Zr, Cr, Al, Nb, V, Y, Si gibi elementler dâhil edilerek elde edilen çok fazlı kaplamaların aşınmaya daha dirençli oldukları ve daha iyi yüzey kalitesi sağladıkları gözlenmiştir. Kaplamaların endüstriyel uygulamalarda kullanım alanları ve şartlarına bağlı olarak farklı performans özelliklerine sahip olduğu bilinmektedir. Darbeli yüklere maruz kalan özellikle dövme yönteminde kullanılan kalıpların ve takım elemanlarının tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi, aşınma davranışlarının darbeli-kayma aşınma esasına dayalı olarak geliştirilen yöntemler sayesinde incelenmesini ve sonuçların değerlendirilmesini gerektirmektedir. Bu amaç doğrultusunda yapılan TiN esaslı PVD kaplı numunelerin aşınma davranışları darbeli-kayma test prensibine göre dizayn edilmiş test düzeneği ile belirlenmiş olup sonuçlar aynı alandaki bilimsel çalışmalardaki veriler ile kıyaslanarak oluşturulmuştur.

Çalışmada değişken parametrelerin kaplama yapısına etkileri S-N değişim oranları kullanılarak belirlenen grafikler ve ANOVA analizleri ile elde edilen katkı oranlarının tespiti sayesinde değerlendirilmiştir. Değişken kaplama parametreleri olarak belirlenen Zr hedef malzeme akımı, bias gerilimi ve çalışma basıncı değerlerinin; kaplama kalınlıklarına, mikrosertlik ve nanosertlik değerlerine, adezyon dayanımlarına ve aşınma oranlarına etkisi belirlenmiştir. Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda kaplama yapısına en fazla etki eden değişken kaplama parametrenin bias gerilim değerindeki artış olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte çalışmada gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında kaplama yapısını ve özelliklerini etkileyen ikinci önemli etkenin Zr hedef malzeme akımı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bias geriliminin en temel etken olması yanında, Zr hedef malzeme akımının kaplama tabakasının sertlik ve adezyon dayanımı gibi özelliklerine önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Çalışma basıncındaki değişim ise bias gerilimi veya Zr hedef malzeme akımı kadar olmasa da kaplama yapısına önemli katkıları olduğu belirlenmiştir.

8.1. Kaplama Yüzey Morfolojilerinin ve Kesitlerinin İncelenmesi

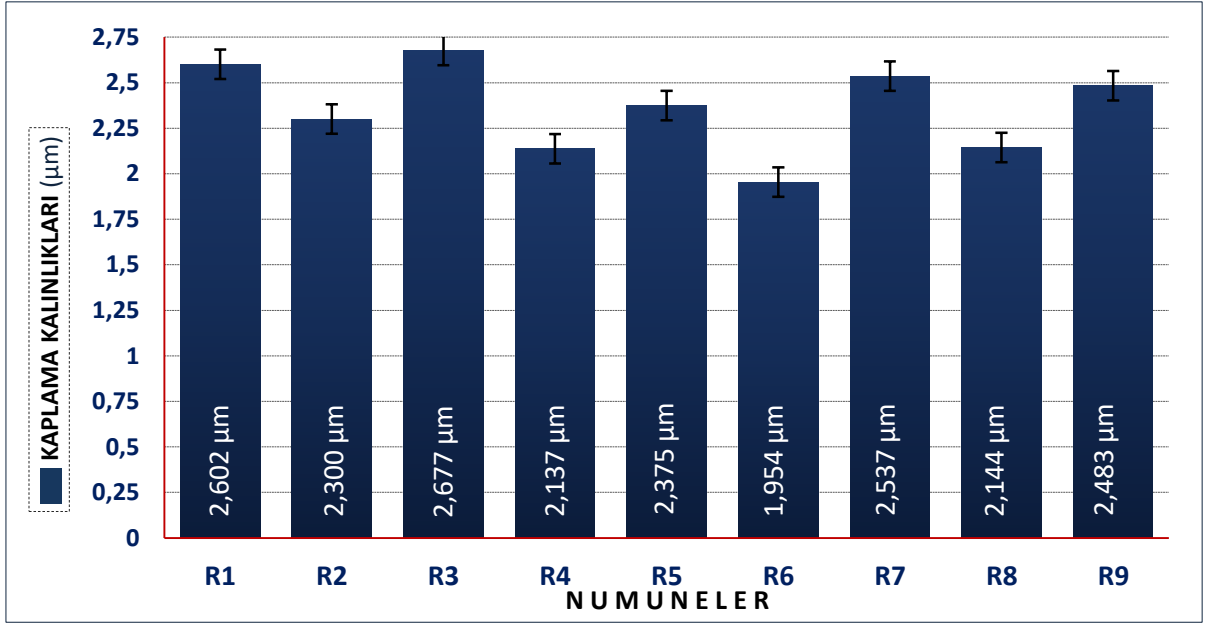
Kaplamaların yüzeyleri metalik parlak açık sarı görünümündedir. Kaplamalar genellikle kaplama yapısındaki iç gerilmelerin meydana getirdiği düzensizliklerin azalması ve ark oluşumunu engellemesi sayesinde yoğun ve düzgün bir yapıda oluşmuştur. Kaplama uygulamasında, değişken kaplama parametreleri kaplama yapısı üzerinde farklı etkilere sahip olmaktadır. Bu değişken parametrelerden bias gerilimi artırıldığında, kaplamanın oluşumunu sağlayan atomlar daha yüksek enerjiye sahip olmakta ve bu sayede parça yüzeyine çarptıklarında daha yoğun bir yapının oluşmasını sağlamaktadırlar. Aynı zamanda, enerjisi artmış olan iyonların büyümekte olan kaplama tabakası yüzeyine çarpmaları sonucunda yüzeyde bulunan mevcut atomların geri sıçramalarına neden olmakta ve böylece kaplama hızının azalmasına yol açmaktadır.

Numunelerin değişken kaplama parametreleri ile TiAlZrN kaplanması esnasında kaplama bölümüne aynı anda yerleştirilmiş olan cam levha altlıklar üzerine de kaplanan kaplama tabakalarının yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak elde edilmiştir. Tane boyutları, kaplamaların tane yapılarının mikroskopta büyütülerek çekilen fotoğraflarından ASTM standart tane büyüklükleri ile kıyaslanması sonucunda incelenen tane büyüklüğünün hangi tane boyutuna tekabül ettiği bulunarak belirlenmektedir. Kaplama tabakaları yüzey SEM görüntülerinden elde edilen tane boyutları değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

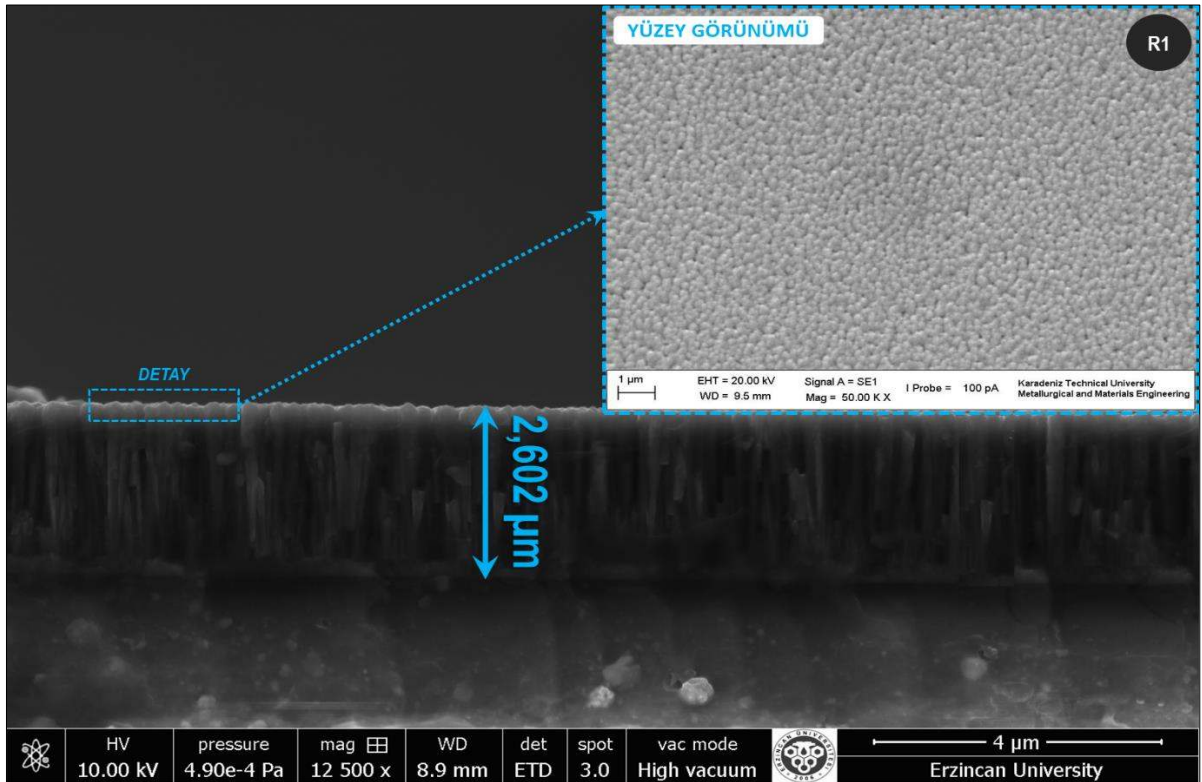
Tablo 4. Kaplama tabakalarının tane boyutu değerleri

NUMUNE KODU	TANE BOYUTU (nm)
R1	345 ± 50 nm
R2	372 ± 50 nm
R3	435 ± 50 nm
R4	316 ± 50 nm
R5	384 ± 50 nm
R6	330 ± 50 nm
R7	282 ± 50 nm
R8	327 ± 50 nm
R9	311 ± 50 nm

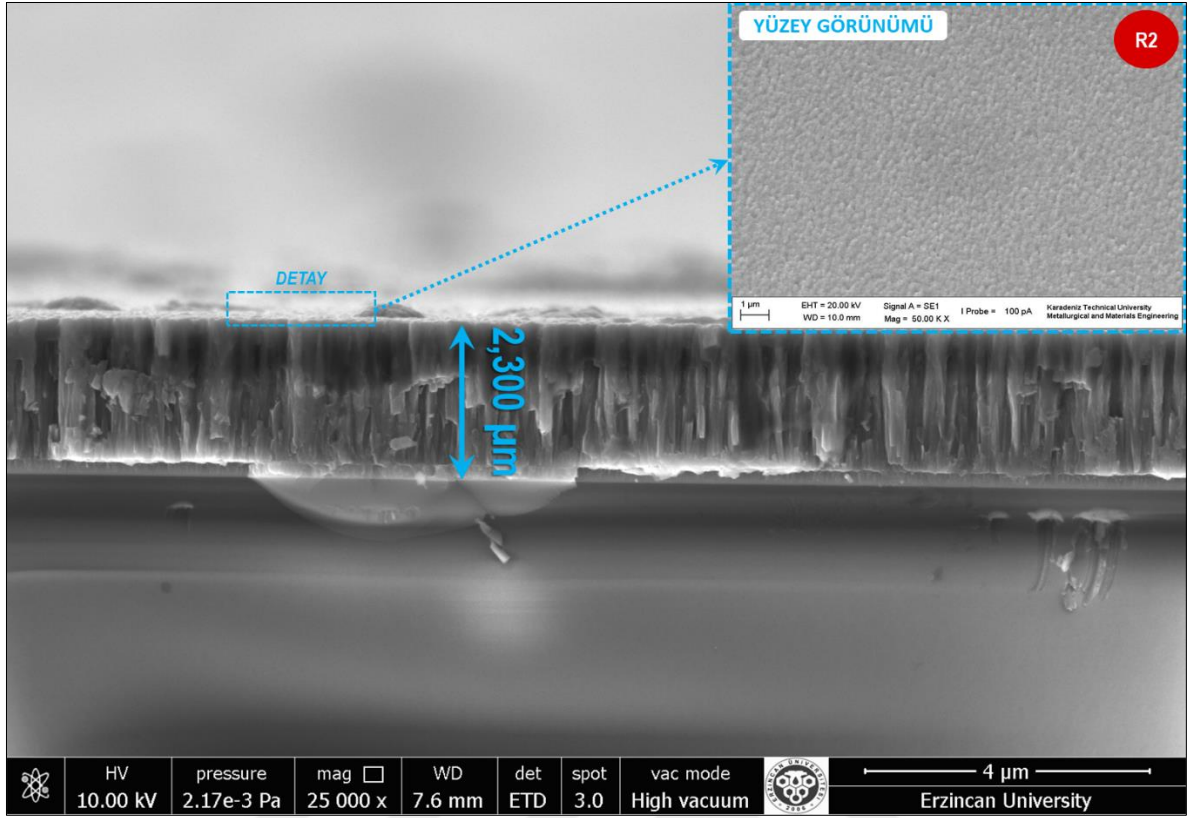
Numunelerle birlikte kaplanan cam levhaların gevrek kırılması sonucunda elde edilen kesitlerin SEM görüntüleri sayesinde belirlenen kaplama kalınlıkları Şekil 55'te, kaplamaların kesit ve yüzey SEM görüntüleri Şekil 56 - 64'te verilmektedir.



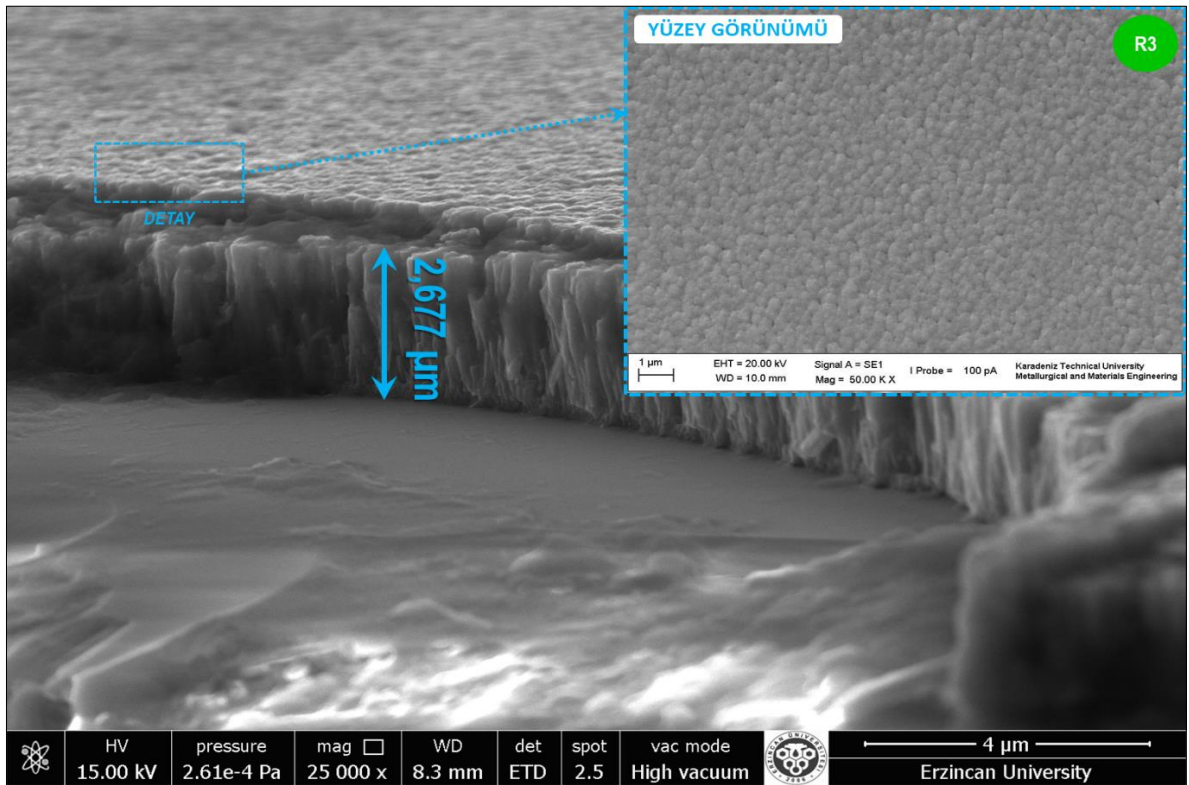
Şekil 55. Elde edilen kaplamaların ölçülen ortalama kalınlık değerleri



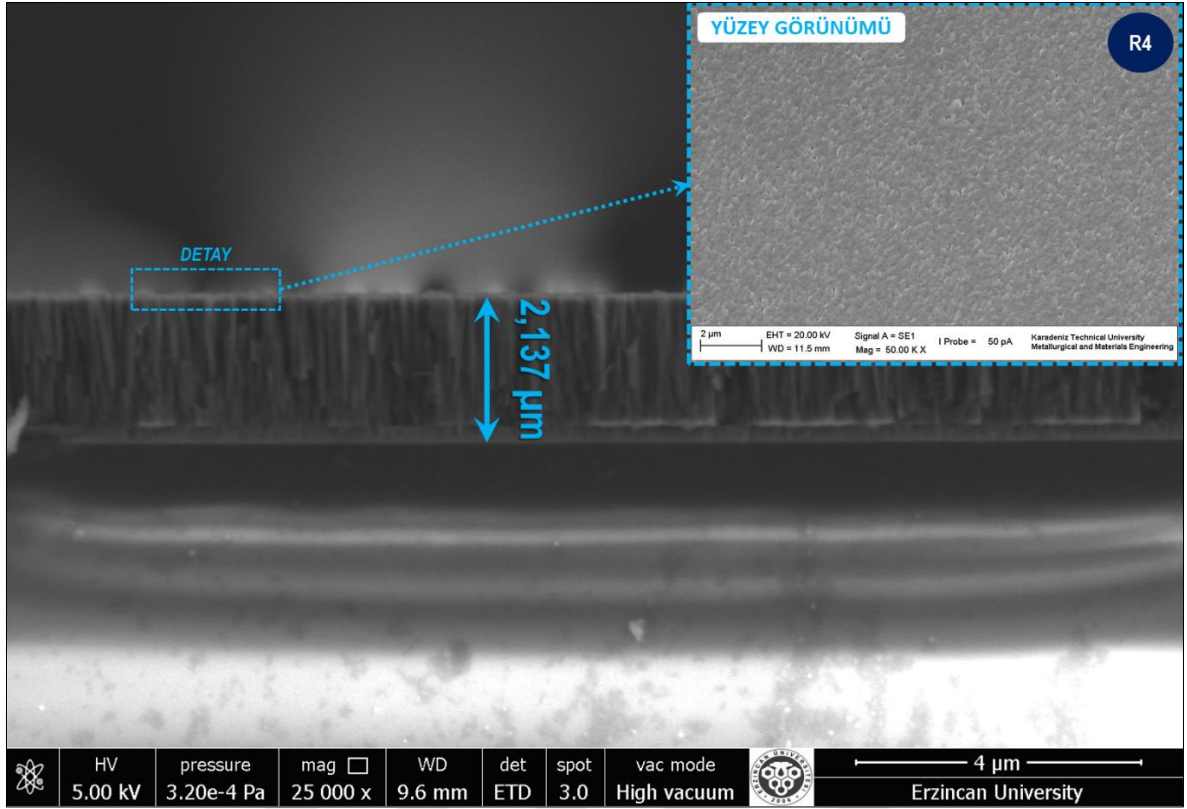
Şekil 56. R1 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görüntüsü



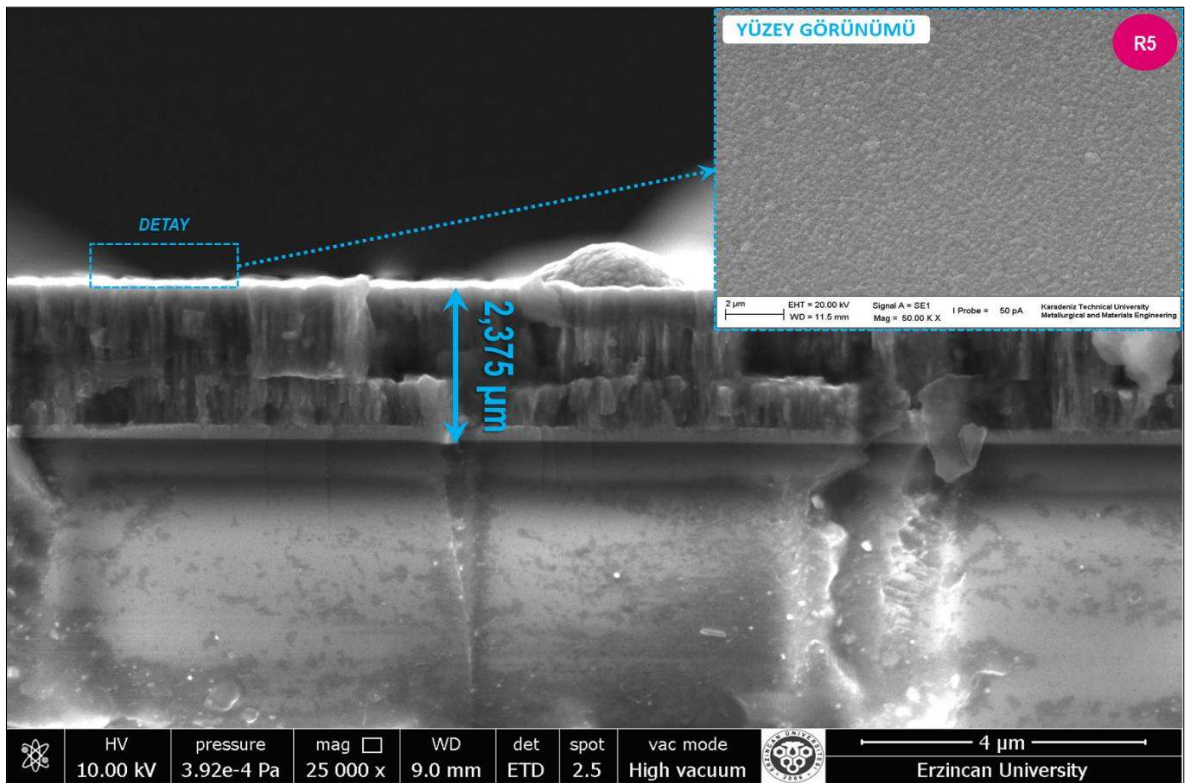
Şekil 57. R2 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü



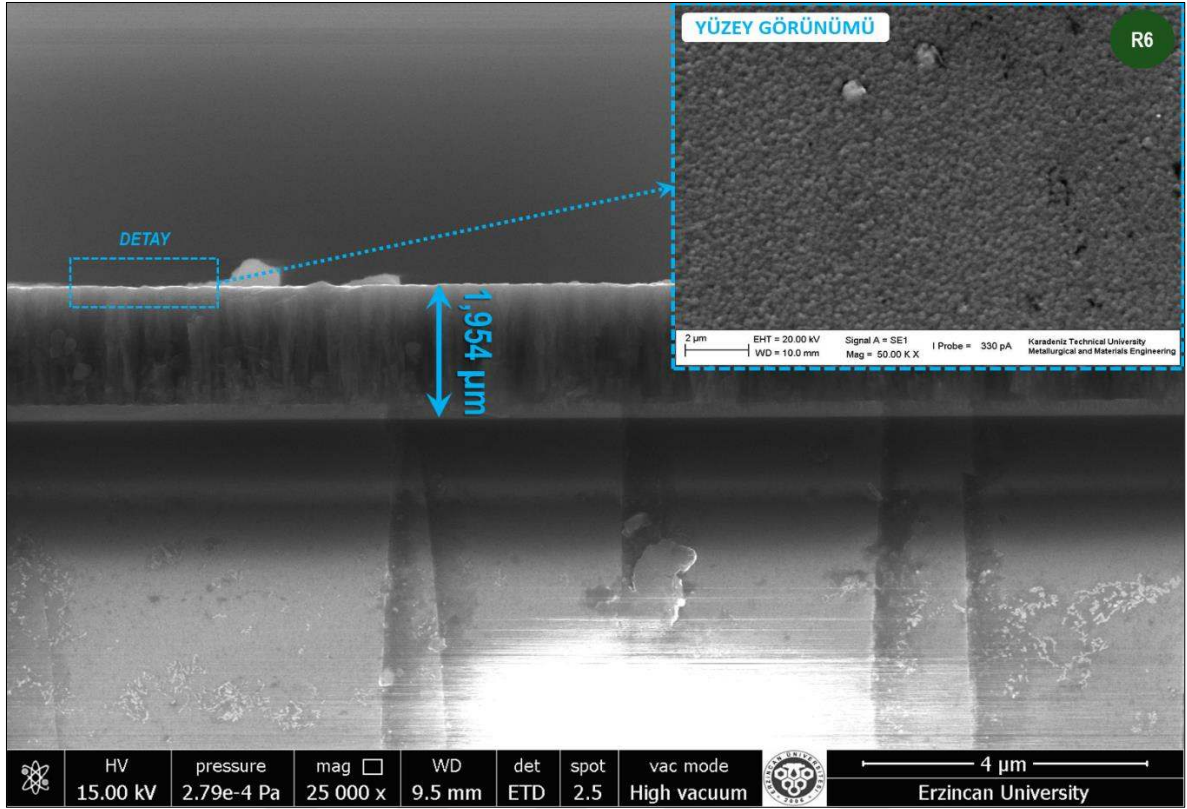
Şekil 58. R3 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü



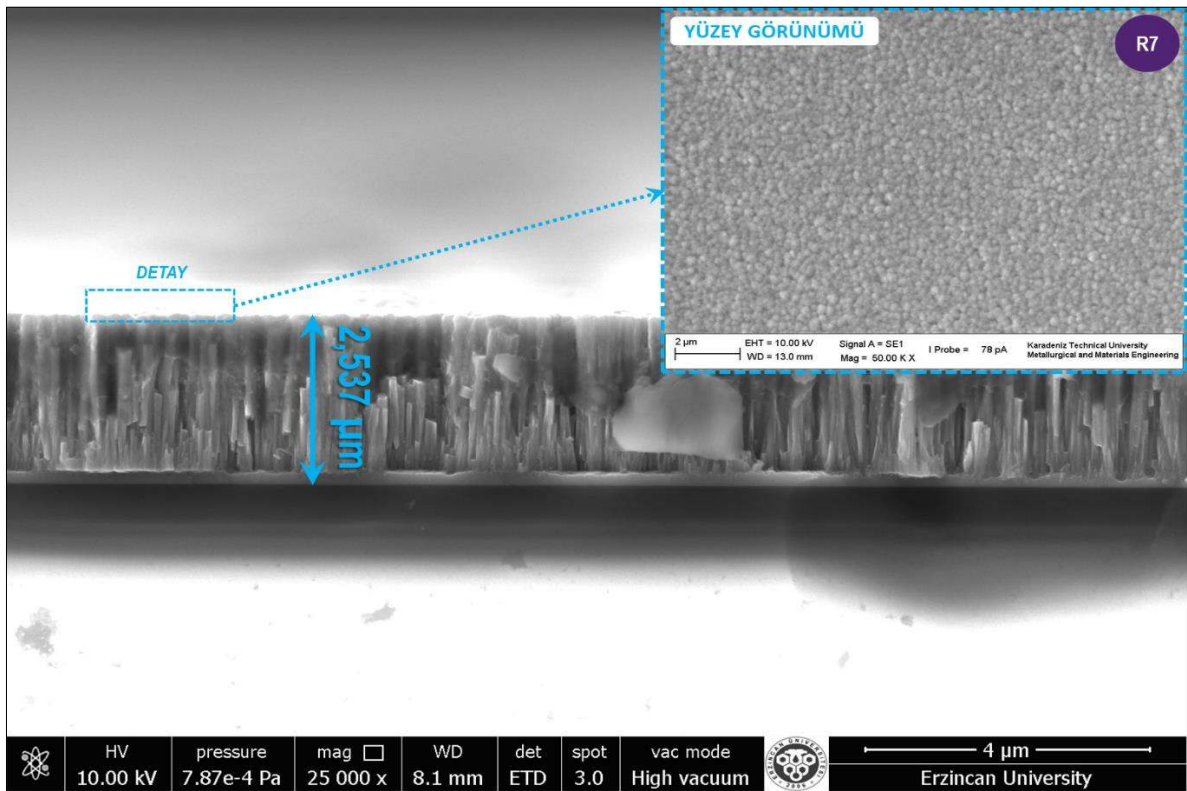
Şekil 59. R4 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü



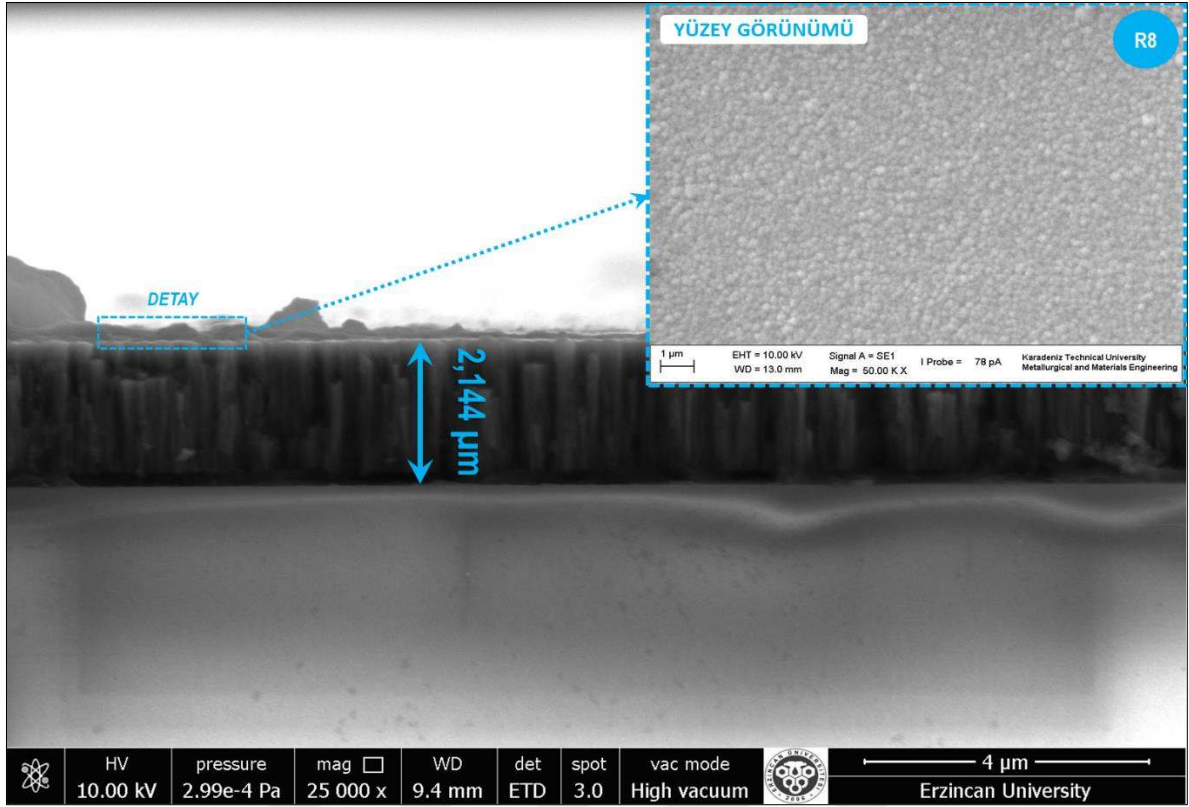
Şekil 60. R5 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü



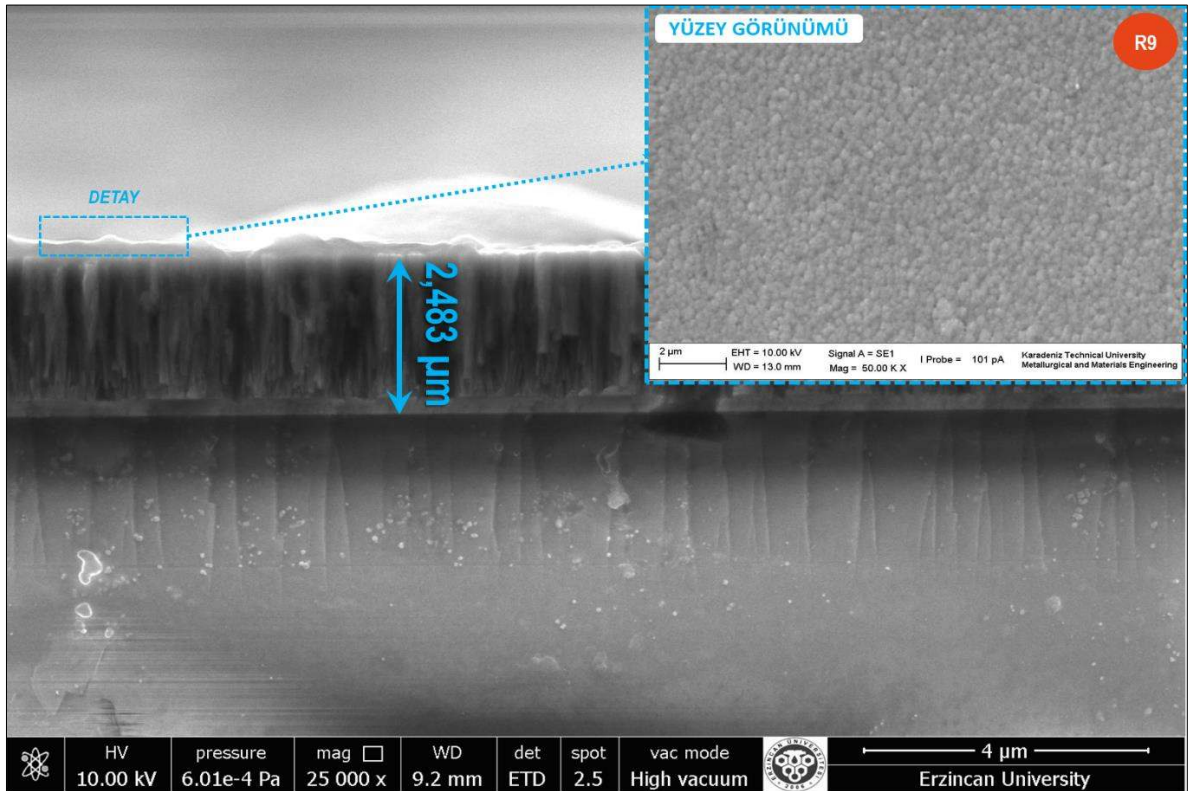
Şekil 61. R6 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü



Şekil 62. R7 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü



Şekil 63. R8 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü



Şekil 64. R9 numunesi yüzeyinin SEM görüntüsü ve kalınlık değeri ölçüm görünümü

Şekil 56-64'te verilen şekillerde, elde edilen yüzey ve kesit görünümeleri incelendiğinde R1, R4 ve R7 numunelerinde bias gerilimi ve Zr hedef malzeme akımının artması ile daha ince yapılı kaplama yapıları elde edildiği görülmektedir. Yüksek bias gerilimi (90V) ve Zr hedef malzeme akımı (5A) sonucunda taban malzeme yüzeyi daha yoğun bir iyon bombardımanına uğramaktadır. Artan iyon bombardımanı, kaplama tabakasının büyümesi esnasında kaplama yapısında daha fazla çekirdeklenmeye sebep olmaktadır ve böylece kaplama tabakası daha ince yapılı oluşmaktadır. Aynı zamanda artan bias gerilimi ile yüksek enerjili atomların taneler arası boşluklara girerek daha yoğun bir yapının oluşmasını sağlamaktadır [95, 96].

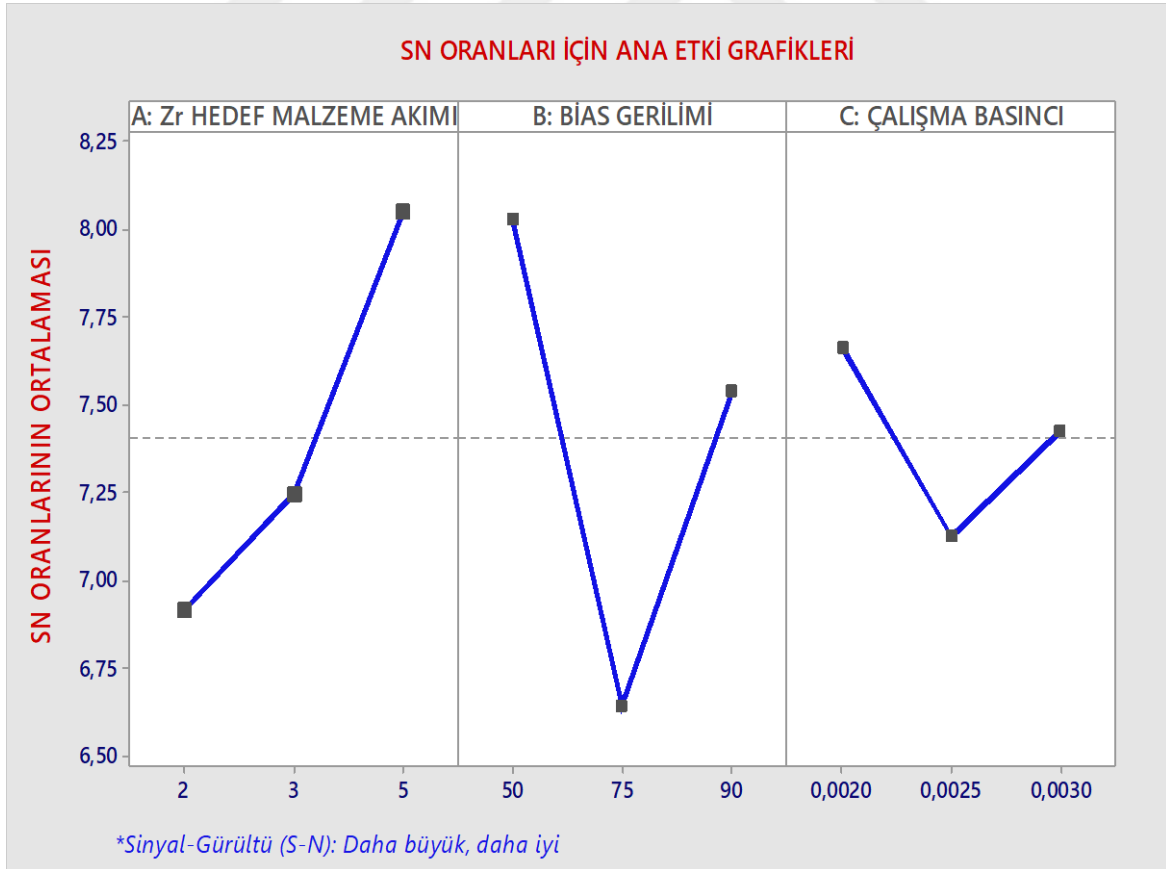
Bias geriliminin 90 V değerinde sabit olduğu R7, R8 ve R9 numunelerinden en düşük çalışma basıncına ve en yüksek Zr hedef malzeme akımına sahip R7 numunesinin SEM görüntülerine bakıldığında en ince taneli kaplama tabakası olduğu görülmektedir. Yüksek hedef malzeme akımı ve düşük çalışma basıncında biriktirilen atomlar taban malzeme yüzeyine ulaşırken çarpışabilecekleri gaz atomları azalması sayesinde taban malzeme yüzeyine daha yüksek enerji ile ulaşmaktadırlar. Daha önce de belirtildiği gibi bu durumda yüzeyde artan atom hareketliliği sayesinde daha ince yapılı bir kaplama tabakası oluşmaktadır. Çalışma basıncının kaplama tabakasının yapısına bu etkisini teyit etmek için aynı şekilde bias gerilim değerinin sabit tutulduğu R1, R2 ve R3 numunelerine bakıldığında; daha düşük çalışma basıncına sahip olan R1 numunesinin daha ince taneli yapıda ve daha yüksek çalışma basıncına sahip olan R3 numunesinin ise daha kalın taneli bir yapıda oluştuğu belirlenmektedir [97].

Şekil 56-64'te verilen şekillerde, cam altlıklar üzerine biriktirilmiş olan kaplama tabakalarının gevrek kırılması ile elde edilen radyal doğrultudaki kesitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde, kaplama tabakasının kaplama yüzeylerine dik doğrultuda büyümüş sıralı kolonsal bir yapıda oldukları görülmektedir. Aynı zamanda SEM görüntülerinden belirlenen kaplama tabakası kalınlıklarına bakıldığında en yüksek kaplama kalınlığının R3 (2,677 μm) numunesinde ve en düşük kaplama kalınlığının ise R6 (1,954 μm) numunesinde elde edildiği görülmektedir. R3 ve R6 numunelerinin değişken kaplama parametrelerine bakıldığında sırasıyla; Zr hedef malzeme akımları 5A ve 2A, bias gerilimleri 50V ve 75V, çalışma basınçları 3×10^{-3} ve 3×10^{-3} değerlerinde olduğu görülmektedir. Çalışma basıncı her iki numune için de aynı olmasının yanında R3 numunesinin Zr hedef malzeme akımı daha büyük ve R6 numunesinin ise bias geriliminin daha yüksektir. Bu aşamada yapılan çalışmada değişken parametrelerin kaplama yapısına etki derecelerinin belirlenmesi hangi

parametrenin daha etkin olduğunun anlaşılmasını sağlayacaktır. Kaplama parametrelerinin kaplama kalınlıklarına etkisi S/N oranları ile ANOVA analiz yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

8.1.1. Değişken Kaplama Parametrelerinin Kaplama Kalınlıklarına Etkisi

TiAlZrN bileşimi ile kaplı numunelerin kesit görüntüleri incelenerek kaplama parametrelerinin elde edilen kalınlık değerlerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan istatistiksel çalışmada elde edilen veri sinyalinin verilerdeki gürültüye (S/N) oranı kaplama kalınlığına etkiyen parametrelerin etki derecesini belirlemede kullanılmıştır. Kaplama kalınlıklarının S/N oranlarının belirlenmesi “daha yüksek daha iyi” kriterine göre Minitap programı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan istatistiksel analizlerin Zr hedef malzeme akımı, bias gerilimi ve çalışma basıncına göre S/N oranlarının ortalamasına göre değişim grafikleri Şekil 65’te verilmektedir [98, 99].



Şekil 65. Değişken kaplama parametrelerinin kaplama kalınlığına etkisi

Verilen grafiklerden elde edilen bilgiler ışığında değişken kaplama parametrelerinin kaplama kalınlıklarına etki derecelerinin belirlendiği S/N oranlarının ortalamaları Tablo 5’te verilmektedir. Ayrıca değişken parametrelerin kaplama kalınlıklarına katkı oranlarının belirlendiği ANOVA analiz sonuç değerleri Tablo 6’da verilmektedir.

Tablo 5. Kapsama kalınlığına etki eden değişken kapsama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	KAPLAMA KALINLIĞI			DELTA (MAX-MİN)	ETKİ DERECESİ
	1’İNCİ SEVİYE	2’NCİ SEVİYE	3’ÜNCÜ SEVİYE		
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	6,916	7,243	8,051	1,135	2
BİAS GERİLİMİ	8,031	6,643	7,537	1,389	1
ÇALIŞMA BASINCI	7,663	7,124	7,424	0,539	3

Tablo 6. Değişken kapsama parametrelerinin kapsama kalınlıklarına ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	SERBESTLİK DERECESİ	KARELER TOPLAMI	ORTALAMA KARELER	F DEĞERİ	P DEĞERİ	KATKI ORANI (%)
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	2	2,0461	1,0230	1,70	0,371	% 30,5
BİAS GERİLİMİ	2	2,9723	1,4861	2,47	0,288	% 44,5
ÇALIŞMA BASINCI	2	0,4372	0,2186	0,36	0,734	% 6,5
OLAĞAN ÖLÇÜM HATASI PAYI	2	1,2045	0,6022	-	-	-
TOPLAM DEĞER	8	6,6601	-	-	-	-

Grafik ve tablolardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde kapsama kalınlığına en fazla etki eden parametrenin bias gerilimi, daha sonra Zr hedef malzeme akımı ve en son çalışma basıncının etkisi olduğu görülmektedir. Değişken kapsama parametrelerinden bias geriliminin kapsama kalınlığına katkı oranı % 44,5, Zr hedef malzeme akımının katkı oranı % 30,5 ve çalışma basıncının katkı oranı ise % 6,5 olarak hesaplanmıştır.

Kaplama kalınlıkları, ANOVA analizlerine göre en etkin parametre olan bias gerilimi açısından incelendiğinde, bias geriliminin artmasıyla kaplama kalınlıklarının azaldığı görülmektedir. R1, R5 ve R8 numune grubu dikkate alındığında, bias gerilim değerleri küçükten büyüğe R1, R5 ve R8 şeklinde sıralanırken, kaplama kalınlıkları küçükten büyüğe R8, R5 ve R1 şeklinde sıralanmaktadır. Bu durumun artan bias gerilimi ile birlikte kaplamanın maruz kaldığı iyon bombardımanının oluşturduğu çekiçleme (ion-peening effect) etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Literatürde bias geriliminin artmasıyla kaplamaların daha yüksek iyon bombardımanına maruz kaldığı ve iyon çekiçleme etkisiyle kaplama kalınlığının azaldığı rapor edilmektedir. Bu etki, artan bias gerilimi ile taban malzeme yüzeyine yüksek enerji ile çarpan iyonların yüzeydeki mevcut iyonları savurarak yüzeyden ayırması neticesinde artan bias gerilimi ile yüksek enerjili iyonların kaplama kalınlığını etkilemesi şeklinde açıklanabilmektedir [98]. Yapılan bu çalışmada da bias geriliminin kaplama kalınlığına bahsedilen etki ile gelişmiş olduğu görülmektedir.

Değişken parametrelerden kaplama kalınlığına en fazla etki eden parametrenin bias geriliminin olduğu belirlenmiş olsa da, bias gerilim değerinin sabit olarak 75 V değerinde kaldığı R4, R5 ve R6 numune grubu incelendiğinde bu grup arasında kaplama kalınlığı en fazla olan numunenin R5 numunesi olduğu görülmektedir. Aynı şekilde R7, R8 ve R9 numune grubu incelendiğinde de kaplama kalınlığı en fazla olan numunenin R7 numunesi olduğu görülmektedir. Bu durum, değişken parametrelerden kaplama kalınlığına etki eden ikinci önemli parametrenin Zr hedef malzeme akımı olduğunu kanıtlamaktadır. Zr hedef malzeme akımı artırıldığında kaplama kalınlığı da yaklaşık olarak lineer olarak artmaktadır. Bu durumun esas nedeni, Zr hedef malzeme akımı artırıldığında sıçratılan atom miktarı arttığından ve yayılan bu iyonların plazma içerisindeki nötr atomlara çarpmasıyla oluşan iyonlaşma miktarının artmasından kaynaklanmaktadır [99].

8.2. EDS Analizi Sonuçları

TiAlZrN kaplama tabakalarının kimyasal bileşimleri yüzeylerden alınan EDS analizleri ile saptanmıştır. Analizler neticesinde elde edilen kimyasal bileşim değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Analizlerden elde edilen verilere bakıldığında, kaplamanın yapısında en fazla bulunan elementten en az bulunan elemente doğru oluşan sıralama; Ti, Al ve Zr elementidir. Azot elementinin miktarı, analizlerden elde edilen diğer elementlerin kimyasal bileşim yüzde toplamından artakalan yüzde olarak hesaplanarak verilmiştir.

Kaplama tabakasının kimyasal bileşimine etki eden en önemli etkenlerden birinin hedef malzemenin sıçratma verimi olduğu bilinmektedir [108]. R1, R2 ve R3 numaralı numune grubunda bias gerilim değeri 50V olarak sabit kaldığında, kaplama tabakasındaki azot miktarının Zr hedef akımı ve çalışma basıncı arttıkça azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir. Azot elementinin atom ağırlığının kaplama tabakasında kullanılan diğer elementlerin atom ağırlığından daha düşük olması nedeniyle, artan Zr hedef malzeme akımı ve çalışma basıncı ile artış gösteren iyon akısı enerji, daha hafif olan azot elementinin geri sıçramasında artışa neden olmuş ve kaplama tabakasındaki azot miktarının azalmasında etkili bir faktör olmuştur [100].

Tablo 7. TiAlZrN kaplama tabakasının EDS analiz sonuçları

NUMUNE KODU		EDS ANALİZ SONUÇLARI			
		Ti	Al	Zr	N
R1	% ATOMİK DEĞERİ	43,5	5,2	3,3	48
R2		47	6	4,8	42,2
R3		50	8	11	30
R4		45	6	3	46
R5		46,7	8,3	7,3	37,7
R6		43	7,5	2 ,1	47,4
R7		45	6,1	7,4	41,5
R8		40,6	7,1	2,5	49,8
R9		43,3	9	4,1	43,6

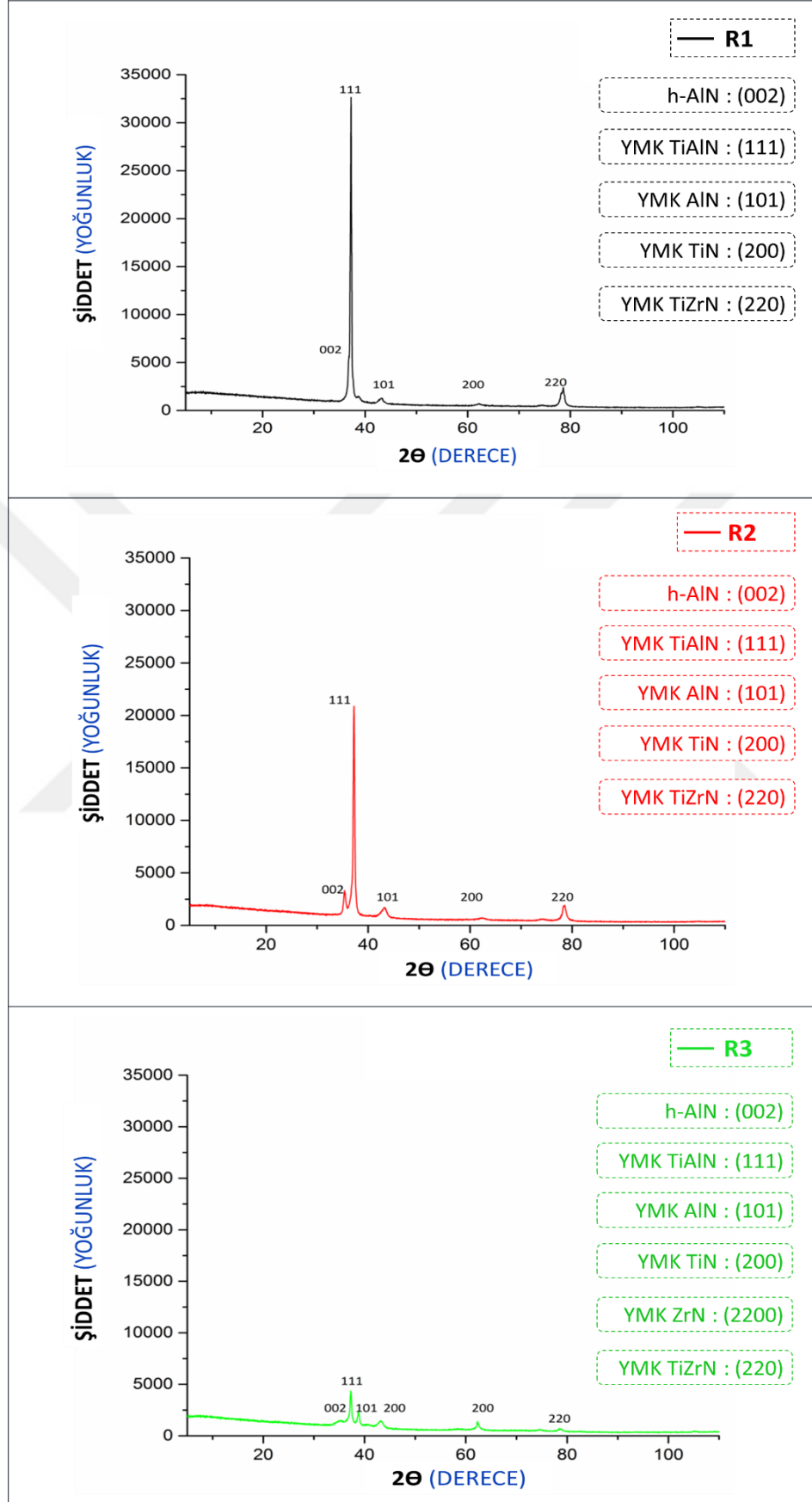
Bias gerilim değeri 75 V değerinde sabit tutularak R4, R5 ve R6 numune grubunda EDS analiz sonuçlarına bakıldığında; Ti, Al ve Zr elementlerinin atomik olarak en fazla bulunduğu ve azot miktarının en az olduğu numunenin R5 olduğu belirlenmektedir. Zr hedef akımının en yüksek olduğu R5 numunesinde, Zr hedef akımının yüksek olmasıyla artan iyon yayılımı sayesinde, hedeften yayılan elektronların argon soy gazı içerisindeki nötr atomlara çarpışma miktarının artması ile birlikte iyonlaşma miktarı artmaktadır. Böylece hedef malzeme akımının fazla olması neticesinde kaplama bileşimindeki kimyasal atomik element miktarları da artış göstermektedir. Çalışma basıncının ise optimum değerinde ($2,5 \times 10^{-3}$ Torr)

olması nedeniyle hedeften sıçratılan atomlar birbiriyle daha az çarpışarak taban malzemeye ulaşmaktadır ve böylece R5 numunesindeki Ti, Al ve Zr elementlerin kimyasal oranları numune grubundaki diğer R4 ve R6 numunelerinden daha fazla olduğu görülmektedir [101]. R4 numunesine bakıldığında, azot dışındaki elementlerin atomik miktarlarının R5 numunesinden daha düşük seviyede oldukları görülmektedir. Bunun nedeni ise Zr hedef akımı değerinin düşük olmasından dolayı meydana gelen düşük iyonlaşma miktarı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. En düşük Zr akım değerine sahip olan R6 numunesinde ise azot dışındaki elementlerin toplam miktarının en az olduğu görülmektedir.

Bias gerilim değerinin 90 V değerinde sabit olduğu R7, R8 ve R9 numune grubundaki kaplamalar incelendiğinde ise; Ti, Al ve Zr atomik olarak element miktarının R8 numunesinde en az olduğu belirlenmektedir. R7, R8 ve R9 numunelerinde Zr elementi hedef akım değeri en düşük olan numune R8 numunesidir. Zr hedef malzeme akımının R8 numunesinde en az olmasının; Ti, Al ve Zr atomik olarak element miktarının R8 numunesinde en az bulunmasının sebebi olduğu düşünülmektedir. Zr hedef malzeme akımının yüksek olduğu R7 numunesinde iyonlaşma miktarının R8 ve R9 numunelerine göre daha yüksek olması, R7 numunesinde elementlerin toplam atomik miktarının kaplama yapısında daha fazla birikmesini sağladığını göstermektedir. Sonuçlara bakıldığında bütün numunelerde Zr hedef malzeme akımı arttığında kaplama yapısındaki Zr element miktarının arttığı görülmektedir.

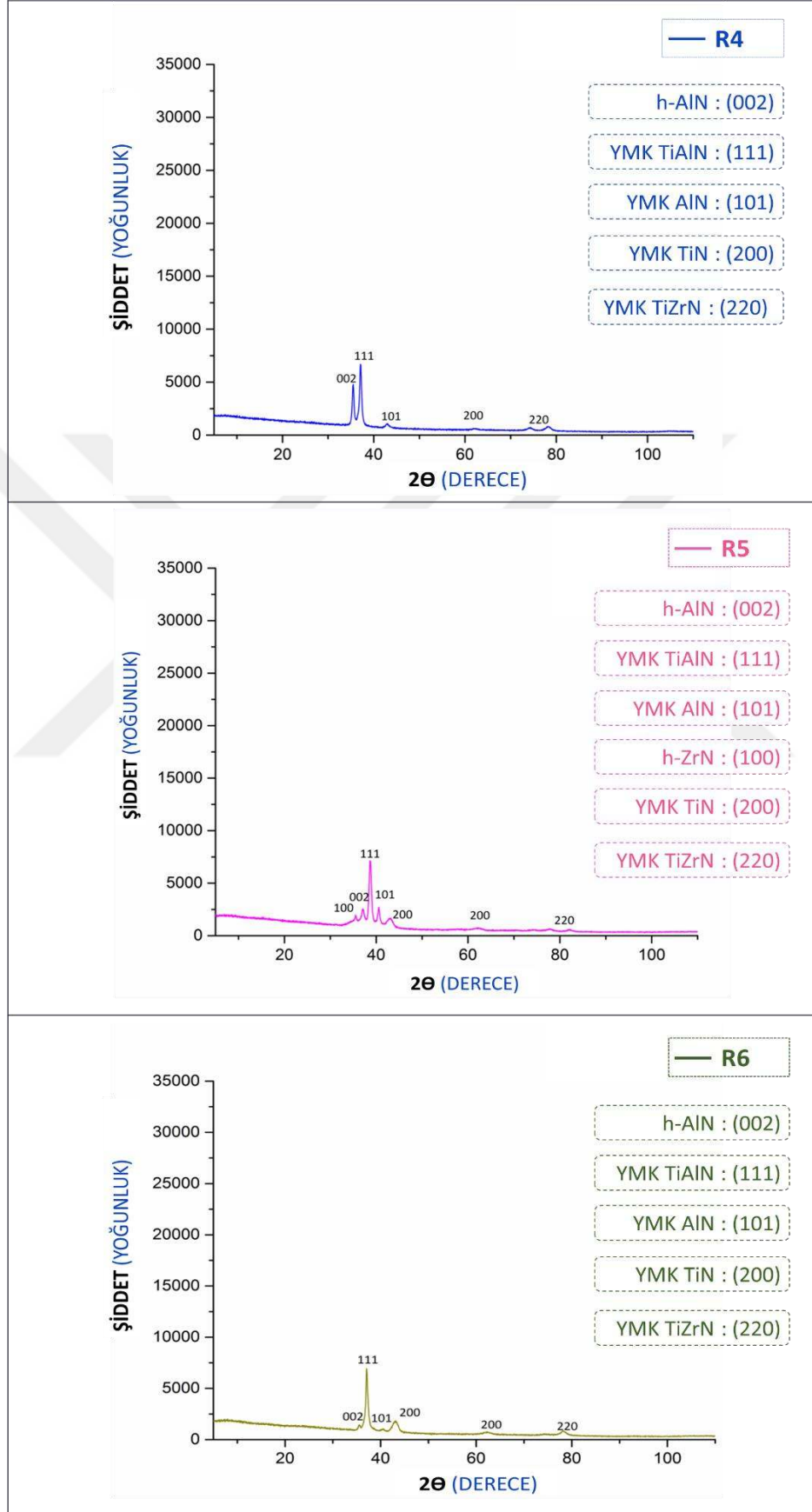
8.3. XRD Analizi Sonuçları

X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD), her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristalin faz için bu kırınım profilleri bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmez ve çok az miktardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. X-Işını Kırınım yöntemiyle ince kaplama tabakalarının nitel ve nicel incelemeleri yapılabilir. Çalışmamızda kullanılan H13 çelik taban malzeme numunelerinin kaplama işlemi esnasında aynı ortama konulan cam altlıklar üzerine kaplanan TiAlZrN kaplama tabakalarının incelenmesi neticesinde elde edilen pikler X ışını difraksiyon (XRD) analizi sonucunda elde edilerek grafikler halinde düzenlenmiştir. Elde edilen grafikler, pik değerleri ve açıklamalarını gösteren şekiller her bir numune için Şekil 66'da verilmektedir.

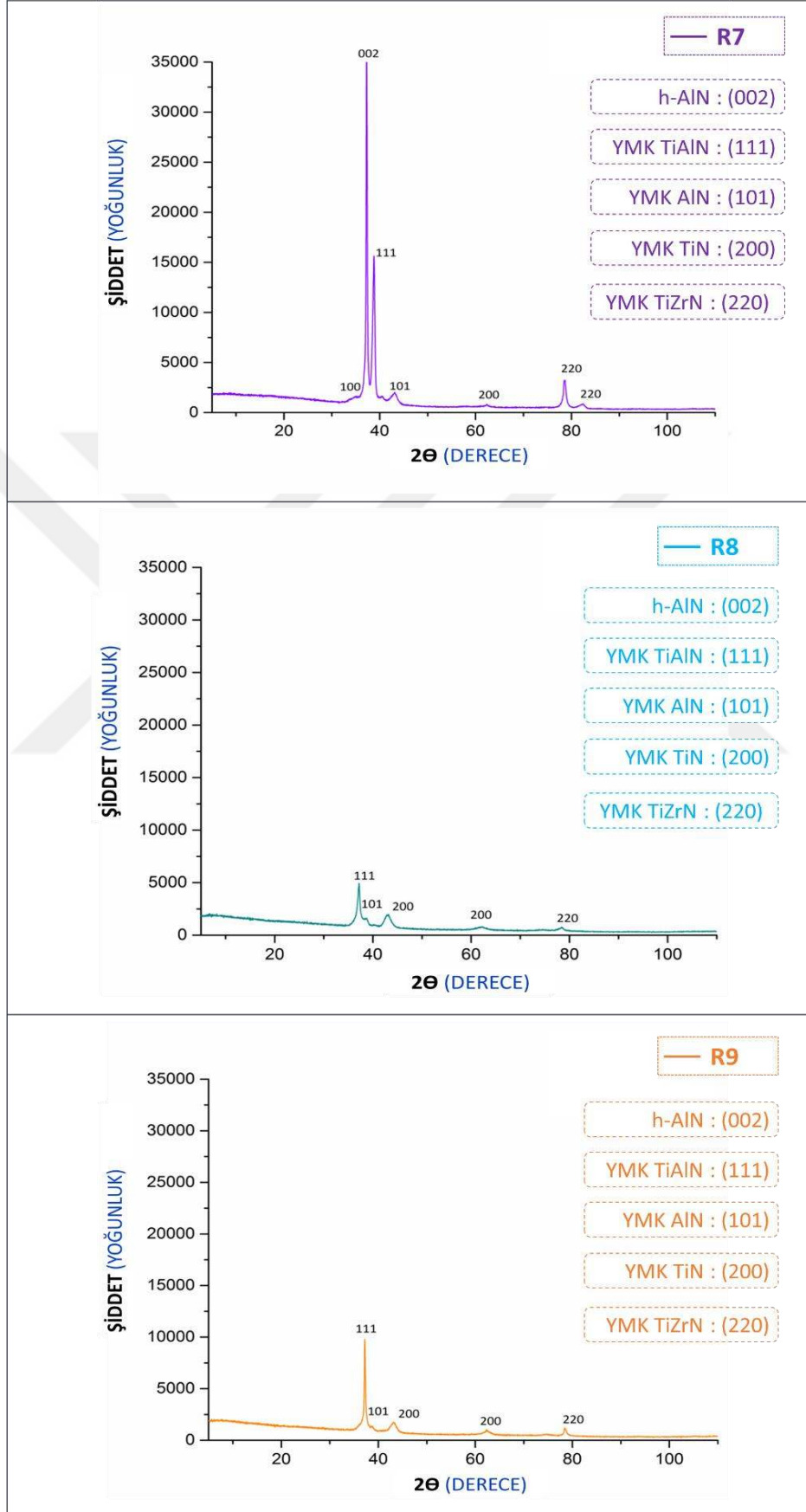


Şekil 66. Numunelerin XRD piklerinin görünümü

Şekil 66'nın devamı



Şekil 66'nın devamı



Bias gerilim değerinin 50 V olarak sabit olduğu R1, R2 ve R3 numune grubundan elde edilen XRD sonuçlarına göre, YMK TiAlN (111), h-AlN (002), YMK AlN (101), YMK TiN (200) ve YMK TiZrN (220) olmak üzere 5 ayrı temel faz belirlenmiştir. R3 numunesinde ayrıca, YMK ZrN (200) fazı belirlenmiştir. R1, R2 ve R3 numunelerinin XRD grafikleri incelendiğinde Zr hedef malzeme akımı arttığında XRD piklerinin, artan Zr hedef malzeme akımı sayesinde taban malzemenin daha güçlü iyon bombardımanına maruz kalması nedeniyle daha düşük ve geniş olduğu gözlemlenmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, artan hedef malzeme akımı ve artan bias gerilimi XRD piklerinin şiddetini azaltmıştır. Bu çalışmada da, Zr akımının artmasıyla birlikte benzer bir etkinin meydana geldiği düşünülmektedir [101, 102, 103, 104].

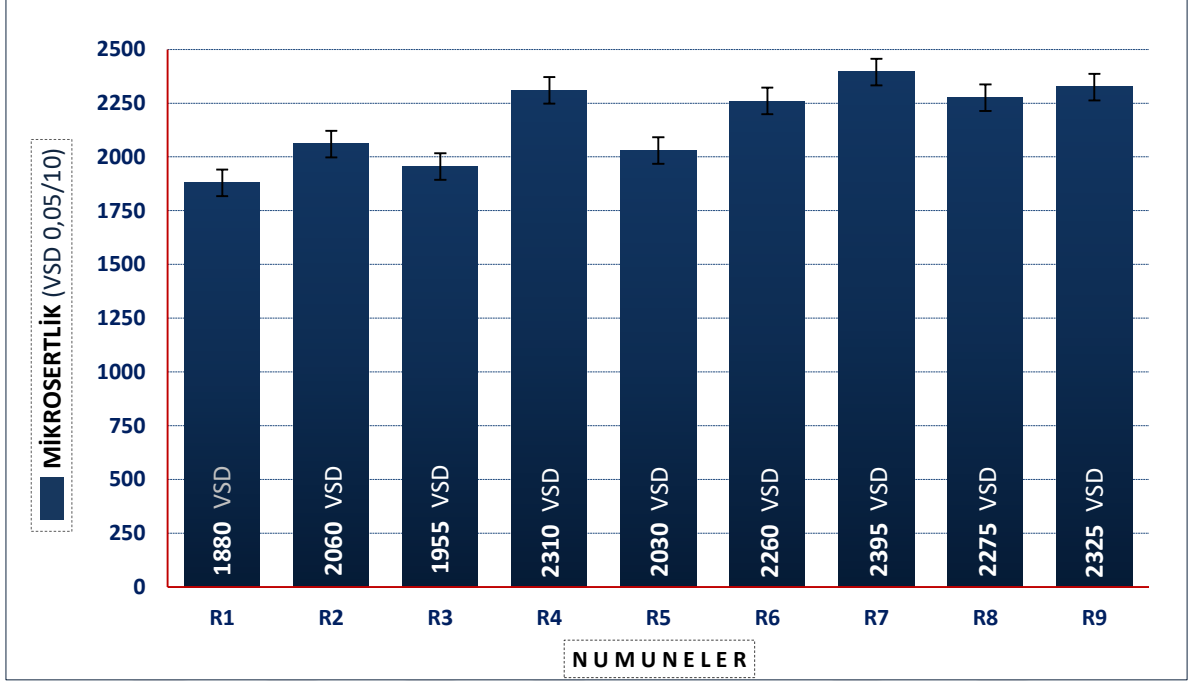
Bias gerilim değerinin 75 V olarak sabit olduğu R4, R5 ve R6 numune grubundan elde edilen XRD sonuçlarına göre, R1, R2 ve R3 numunelerindekilere ek olarak R5 numunesinde h-ZrN (100) fazı tespit edilmiştir. Artan bias gerilimi sayesinde artan taban malzeme sıcaklığı atom hareketliliğini artırarak bu fazın oluşması gerçekleşmiştir. Yüksek bias gerilimi ve çalışma basıncı nedeniyle taban malzeme sıcaklığında meydana gelen artış sonucunda en düşük çalışma basıncı değerinde olan R4 numunesinin hAlN (002) pikinin şiddetinin yüksek iken, çalışma basıncı en düşük olan R6 numunesi h-AlN (002) pikinin şiddetinin düşük olduğu görülmektedir [101, 102, 103, 104].

Bias gerilim değerinin 90 V olarak sabit olduğu R7, R8 ve R9 numune grubundan elde edilen XRD sonuçlarına göre, en yüksek Zr akımı ve en düşük çalışma basıncına sahip olan R7 numunesinin sahip olduğu h-AlN (002), YMK TiAlN (111) ve YMK TiZrN (220) piklerinin şiddetinin R8 ve R9 numunelerinden elde edilen piklere göre daha şiddetli ve yoğun olduğu görülmektedir. R7 numunesindeki XRD piklerinin daha şiddetli olmasının nedeni, düşük çalışma basıncı nedeniyle taban malzeme sıcaklığında meydana gelen düşüşün etkisinden ve ayrıca artan Zr hedef malzeme akımından kaynaklandığı düşünülmektedir [101, 102, 103, 104].

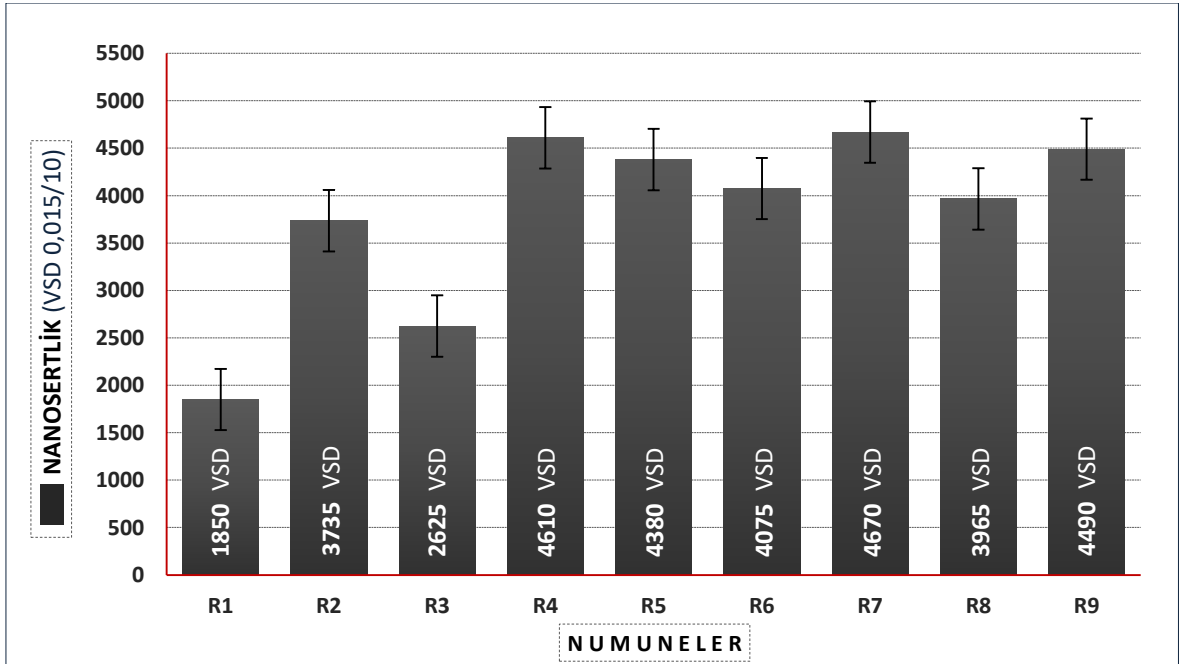
Sonuç olarak bias gerilim değerindeki değişimin numunelerin XRD pikleri üzerindeki etkisi değerlendirilerek piklerin şiddetleri hakkında bazı sonuçlara ulaşılabilmektedir. Bias gerilimi sırasıyla 50V, 75V ve 90V olarak artarak değişim gösterdiğinde ve Zr hedef malzeme akımının 2A olarak sabit kaldığı R1, R6 ve R8 numaralı numunelerin XRD pikleri incelendiğinde, bias geriliminin artması neticesinde YMK TiAlN (111) pik şiddetinin azaldığı gözlemlenmektedir [101, 102, 103, 104].

8.4. Mikrosertlik ve Nanosertlik Analiz Sonuçları

Numunelerin yüzeylerinden 5 farklı noktadan alınarak ortalaması olarak hesaplanan mikrosertlik değerleri Şekil 67’de ve nanosertlik değerleri ise Şekil 68’de verilmektedir.



Şekil 67. Numunelerin mikrosertlik değerleri grafiği

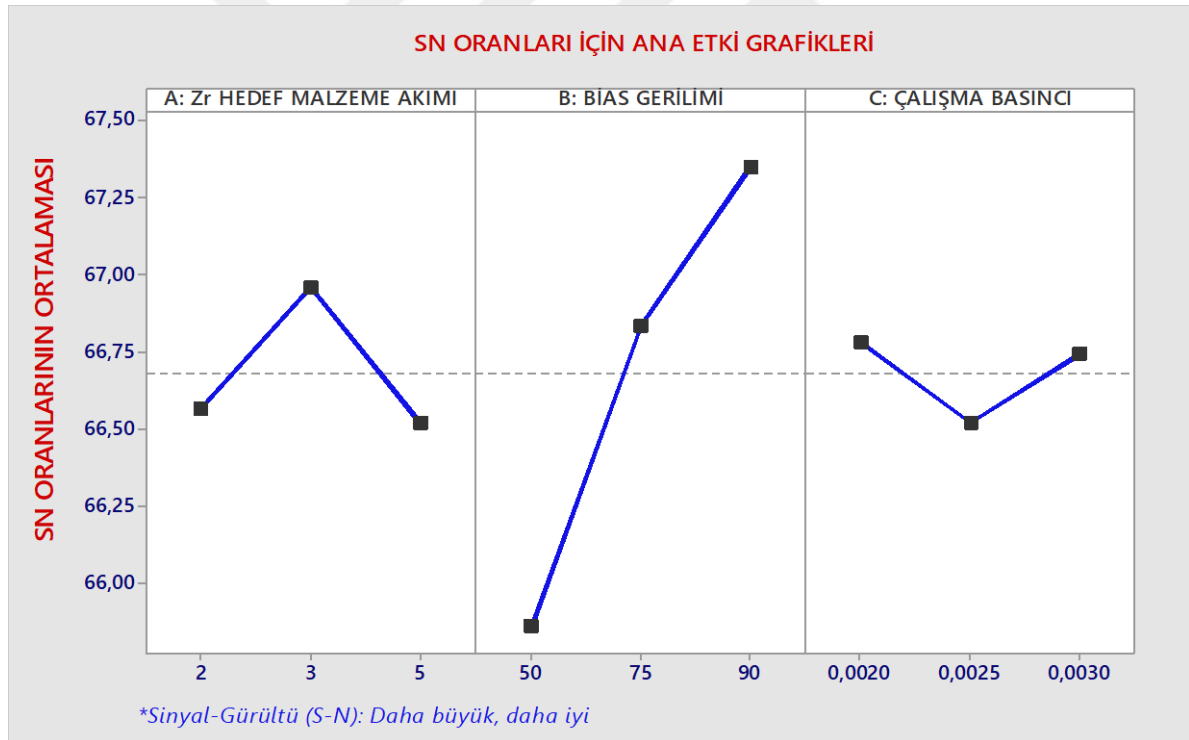


Şekil 68. Numunelerin nanosertlik değerleri grafiği

Grafikler incelendiğinde, en yüksek mikrosertlik değeri 2395 VSD ve en yüksek nanosertlik değeri 4670 VSD ile R7 numunesinden elde edilmiştir. Aynı zamanda en düşük mikrosertlik değeri 1880 VSD ve en düşük nanosertlik değeri 1850 VSD ile R1 numunesinden elde edilmiştir. Değişken kaplama parametrelerinin mikrosertlik ve nanosertlik değerlerine etkilerinin incelenmesi S/N oranları ile elde edilen grafikler ve ANOVA analizleri ile saptanmıştır.

8.4.1. Değişken Kplama Parametrelerinin Mikrosertlik Değerlerine Etkisi

Mikrosertlik değerlerinin S/N oranlarının belirlenmesi “daha yüksek daha iyi” kriterine göre Minitap programı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan istatistiksel incelemeler sonucunda değişken parametrelere göre elde edilen S/N grafikleri Şekil 69’da verilmiştir.



Şekil 69. Değişken kaplama parametrelerinin mikrosertlik değerlerine etkisi

Grafiklerden elde edilen bilgiye göre en etkili parametre bias gerilimi olarak elde edilirken, en az etkili olan değişken parametre çalışma basıncı olarak belirlenmiştir. Şekil 69’a bakıldığında Zr hedef malzeme akımı ve çalışma basıncının etkisinin birbirine daha yakın değerlerde olduğu, ancak bias geriliminin önemli bir fark ile en büyük etkiye sahip

olduğu görülmektedir. Değişken parametrelerin numunelerin mikrosertlik değerlerine etki dereceleri Tablo 8’de verilmektedir. Aynı şekilde ANOVA analizlerinden elde edilen verilere göre değişken parametrelerin etki oranları da Tablo 9’da verilmektedir.

Tablo 8. Mikrosertlik değerlerine etki eden değişken kaplama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	MİKROSERTLİK			DELTA (MAX-MİN)	ETKİ DERECESİ
	1’İNCİ SEVİYE	2’NCİ SEVİYE	3’ÜNCÜ SEVİYE		
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	66,57	66,96	66,52	0,44	2
BİAS GERİLİMİ	65,86	66,83	67,35	1,49	1
ÇALIŞMA BASINCI	66,78	66,52	66,74	0,26	3

Tablo 9. Değişken kaplama parametrelerinin mikrosertlik değerlerine ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	SERBESTLİK DERECESİ	KARELER TOPLAMI	ORTALAMA KARELER	F DEĞERİ	P DEĞERİ	KATKI ORANI (%)
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	2	0,3486	0,17430	0,52	0,659	% 7,5
BİAS GERİLİMİ	2	3,4357	1,71786	5,10	0,164	% 75
ÇALIŞMA BASINCI	2	0,1173	0,05867	0,17	0,852	% 2,5
OLAĞAN ÖLÇÜM HATASI PAYI	2	0,6737	0,33684	-	-	-
TOPLAM DEĞER	8	4,5753	-	-	-	-

Yapılan ANOVA analizleri sonuçlarına göre, numunelerin mikrosertlik değerlerine en çok etki eden değişken parametrenin bias gerilimi olduğu, sonrasında Zr hedef malzeme akımının ve en az etkili olan parametrenin de çalışma basıncı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bias gerilimi, mikrosertlik değerine % 75 katkı oranıyla en önemli etkiye sahiptir. Zr hedef malzeme akımı % 7,5 ve çalışma basıncı % 2,5 katkı oranına sahip olmaktadır. ANOVA analizi sonucunda en etkin parametre olarak belirlenen bias gerilimi açısından değerlendirildiğinde, bias geriliminin artmasıyla mikrosertlik değerlerinde de artış olduğu belirlenmiştir.

Zr hedef malzeme akımının 2A değerinde sabit olduğu ve bias geriliminin sırasıyla 50V, 75V ve 90V olarak arttığı R1, R6 ve R8 numune grubunda, en yüksek mikrosertlik değerine 2275 VSD değeriyle R8 numunesinin ve en düşük mikrosertlik değerine ise 1850 VSD değeriyle R1 numunesinin sahip olduğu görülmektedir. Literatürde de birçok çalışmada olduğu gibi bias gerilimi arttıkça mikrosertlik de artmaktadır. Sertlik değerindeki bu artışın nedeninin, artan bias gerilimi sayesinde kaplama işleminde kaplama tabakası büyümesi esnasında iyon bombardımanında meydana gelen artış olarak yorumlanmaktadır. Aynı zamanda bias geriliminin artmasıyla birlikte sıratılmış iyonların kinetik enerjilerinin arttığı, bu artış sayesinde kaplamaların kafes yapılarında görülen bozulmaları azaltarak kaplama yoğunluğunun artmasını sağladığı, bu sebeple de sertlikte artış meydana geldiği belirlenmiştir. Buna ek olarak kaplama yoğunluğundaki artış ve oluşan ince taneli kaplama tabakası yapısı, kaplama tabakasının sertlik değerinde artış meydana getiren önemli etkenlerdir [105, 106, 107].

Zr hedef malzeme akımının 3A değerinde sabit olduğu ve bias geriliminin sırasıyla 50V, 75V ve 90V olarak arttığı R2, R4 ve R9 numune grubunda, en yüksek mikrosertlik değerine 2325 VSD değeriyle R9 numunesinin ve en düşük mikrosertlik değerine ise 2060 VSD değeriyle R2 numunesinin sahip olduğu görülmektedir. R2, R4 ve R9 numune grubunda en yüksek bias gerilimine ve en küçük tane boyutuna sahip olan R9 numunesinde en yüksek sertlik değeri gözlemlenmiştir. Ayrıca R2 numunesi için elde edilen XRD grafiklerinde piklerin çok şiddetli ve genişliklerinin dar olduğu bilinmektedir. R4 ve R9 numunelerinin XRD grafiklerine bakıldığında piklerin daha düşük şiddette ve genişliklerinin daha dar olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni olarak R2 numunesinde tane yapısının daha büyük olduğu, R4 ve R9 numunelerinin tane yapısının ise daha ince olduğu gösterilmektedir.

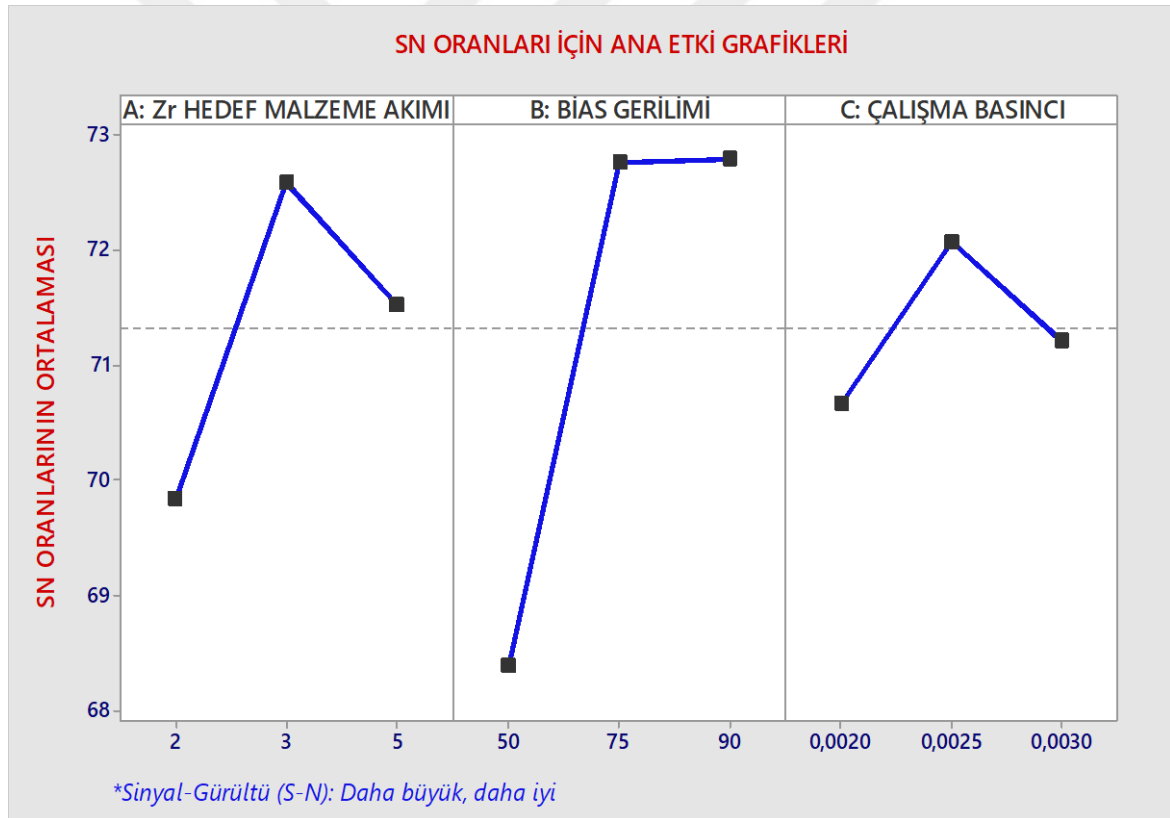
Zr hedef malzeme akımının 5A değerinde sabit olduğu ve bias geriliminin sırasıyla 50V, 75V ve 90V olarak arttığı R3, R5 ve R7 numune grubunda, en yüksek mikrosertlik değerine 2395 VSD değeriyle R7 numunesinin ve en düşük mikrosertlik değerine ise 1955 VSD değeriyle R3 numunesinin sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde bu grupta da en yüksek bias gerilim değerine sahip olan R7 numunesinin mikrosertlik değerinin en büyük olduğu görülmektedir [107, 108].

Bias gerilim değerinin 50V olarak sabit tutulduğu R1, R2 ve R3 numune grubunda, EDS analiz sonuçlarından elde edilen bulgulara göre en yüksek azot miktarına sahip olan R1 numunesinin mikrosertlik değerinin en düşük olduğu görülmektedir. Anlaşılabacağı üzere

artan azot miktarının mikrosertlik üzerinde olumsuz bir etkisi olmaktadır. Bunun nedeni olarak artan azot miktarının kaplama yapısının amorf bir yapıya dönüşmesi olarak gösterilmektedir. Amorf faz nedeniyle kaplama tabakası daha yumuşak bir halde oluşmaktadır [109, 110, 111].

8.4.2. Değişken Kaplama Parametrelerinin Nanosertlik Değerlerine Etkisi

Nanosertlik değerlerinin S/N oranlarının belirlenmesi de aynı şekilde “daha yüksek daha iyi” kriterine göre Minitap programı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan istatistiksel incelemeler sonucunda değişken parametrelere göre elde edilen S/N grafikleri Şekil 70’te verilmiştir.



Şekil 70. Değişken kaplama parametrelerinin nanosertlik değerlerine etkisi

Grafiklerden elde edilen bilgiye göre, en etkili parametrenin bias gerilimi, en az etkili olan parametrenin ise çalışma basıncı olduğu belirlenmiştir. Şekil 70’e bakıldığında Zr hedef malzeme akımı ve çalışma basıncının etkisinin birbirine daha yakın olduğu, ancak bias geriliminin önemli bir fark ile en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir.

Değişken parametrelerin numunelerin nanosertlik değerlerine etki dereceleri Tablo 10'da verilmektedir. Aynı şekilde ANOVA analizlerinden elde edilen verilere göre değişken parametrelerin etki oranları da Tablo 11'de verilmektedir.

Tablo 10. Nanosertlik değerlerine etki eden değişken kaplama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	NANOSERTLİK			DELTA (MAX-MİN)	ETKİ DERECESİ
	1'İNCİ SEVİYE	2'NCİ SEVİYE	3'ÜNCÜ SEVİYE		
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	69,84	72,59	71,53	2,75	2
BİAS GERİLİMİ	68,39	72,77	72,80	4,41	1
ÇALIŞMA BASINCI	70,67	72,08	71,21	1,41	3

Tablo 11. Değişken kaplama parametrelerinin nanosertlik değerlerine ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	SERBESTLİK DERECESİ	KARELER TOPLAMI	ORTALAMA KARELER	F DEĞERİ	P DEĞERİ	KATKI ORANI (%)
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	2	11,560	5,780	2,03	0,330	% 19,5
BİAS GERİLİMİ	2	38,600	19,300	6,78	0,129	% 65,5
ÇALIŞMA BASINCI	2	3,045	1,522	0,53	0,652	% 5
OLAĞAN ÖLÇÜM HATASI PAYI	2	5,696	2,848	-	-	-
TOPLAM DEĞER	8	58,900	-	-	-	-

Yapılan ANOVA analizleri sonuçlarına göre, numunelerin nanosertlik değerlerine en çok etki eden değişken parametrenin bias gerilimi olduğu, sonrasında Zr hedef malzeme akımının ve en az etkili olan parametrenin de çalışma basıncı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bias gerilimi, nanosertlik değerine % 65,5 katkı oranıyla en önemli etkiye sahiptir. Zr hedef malzeme akımı % 19,5 ve çalışma basıncı % 5 katkı oranına sahip olmaktadır. ANOVA analizi sonucunda en etkin parametre olarak belirlenen bias gerilimi açısından değerlendirildiğinde, bias geriliminin artmasıyla nanosertlik değerlerinde de artış olduğu belirlenmiştir.

8.5. Adezyon (Çizik) Testi Analizleri

Kaplamaların çizik testlerinden elde edilen Lc_2 yük değerleri adezyon dayanımlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Elde edilen Lc_2 yük değerleri Tablo 12’de verilmektedir.

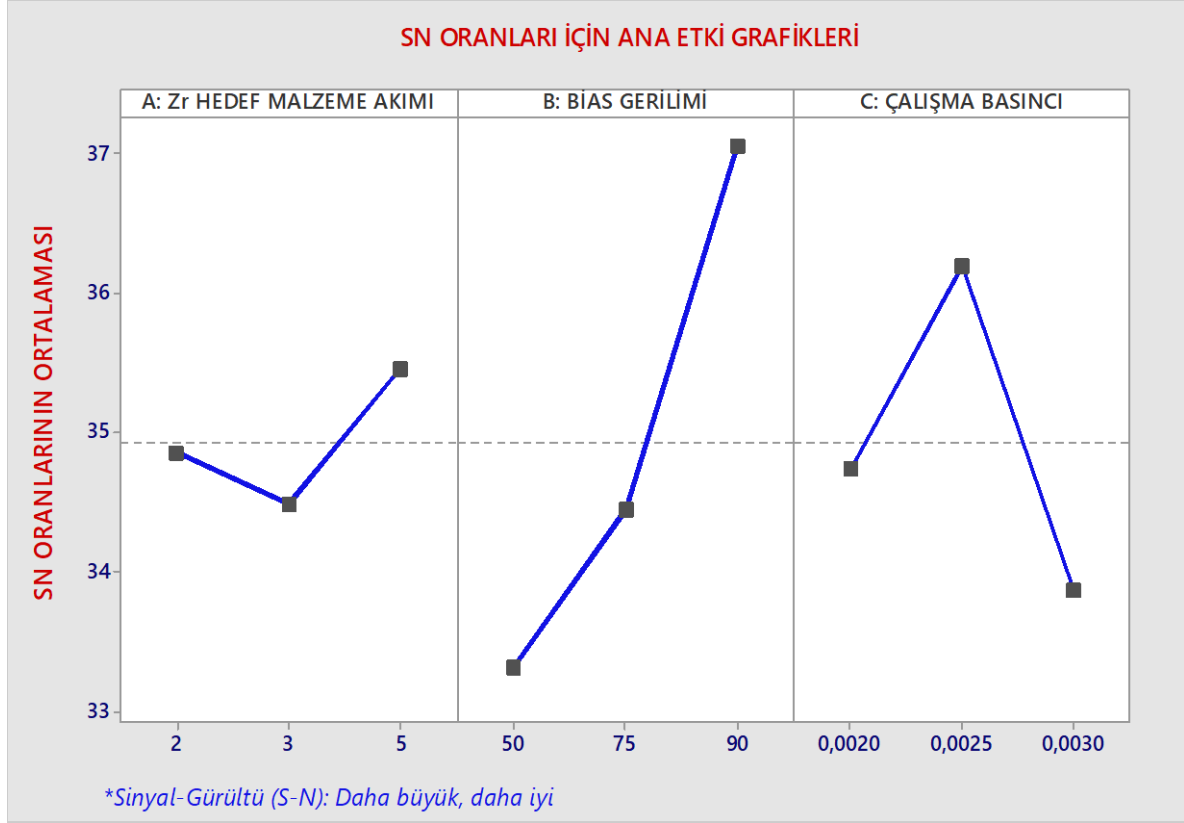
Tablo 12. Kaplamaların (Lc_2) adezyon dayanımları

NUMUNE KODU	ORTALAMA ADEZYON DAYANIM DEĞERİ (N)
R1	45
R2	55
R3	40
R4	45
R5	65
R6	50
R7	80
R8	75
R9	60

Bu çalışmada adezyon dayanımları ile ilgili yorumlar Lc_2 kritik yük değeri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda en yüksek Lc_2 kritik yükü 80 N ile R7 numunesinden elde edilirken, en düşük Lc_2 kritik yükü ise 40 N ile R3 numunesinden elde edilmiştir. Değişken kaplama parametrelerinin adezyon dayanımlarına etkilerinin incelenmesi S/N oranları ile elde edilen grafikler ve ANOVA analizleri ile saptanmıştır.

8.5.1. Kaplama Parametrelerinin Adezyon Dayanımlarına Etkisi

Adezyon değerlerinin S/N oranlarının belirlenmesi “daha yüksek daha iyi” kriterine göre Minitap programı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan istatistiksel incelemeler sonucunda değişken parametrelere göre elde edilen S/N grafikleri Şekil 71’de verilmiştir.



Şekil 71. Değişken kaplama parametrelerinin adezyon dayanımlarına etkisi

Grafiklerden elde edilen bilgiye göre, kaplamaların adezyon dayanımlarına etki eden en önemli parametrenin bias gerilimi olduğu, en az etki eden parametrenin ise Zr hedef malzeme akımı olduğu belirlenmektedir. ANOVA analizlerinden elde edilen verilere göre değişken parametrelerin, L_{c2} yük değeri için numunelerin adezyon dayanımlarına etki dereceleri Tablo 13'te ve değişken parametrelerin etki oranları da Tablo 14'te verilmektedir.

Tablo 13. Adezyon dayanımına etki eden değişken kaplama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	ADEZYON DAYANIMI			DELTA (MAX-MİN)	ETKİ DERECESİ
	1'İNCİ SEVİYE	2'NCİ SEVİYE	3'ÜNCÜ SEVİYE		
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	34,85	34,48	35,45	0,98	3
BİAS GERİLİMİ	33,30	34,43	37,04	3,74	1
ÇALIŞMA BASINCI	34,73	36,19	33,86	2,33	2

Tablo 14. Değişken kaplama parametrelerinin adezyon dayanımlarına ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	SERBESTLİK DERECESİ	KARELER TOPLAMI	ORTALAMA KARELER	F DEĞERİ	P DEĞERİ	KATKI ORANI (%)
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	2	1,455	0,7277	0,48	0,674	% 4
BİAS GERİLİMİ	2	22,049	11,0246	7,34	0,120	% 63,5
ÇALIŞMA BASINCI	2	8,301	4,1507	2,76	0,266	% 24
OLAĞAN ÖLÇÜM HATASI PAYI	2	3,004	1,5022	-	-	-
TOPLAM DEĞER	8	34,810	-	-	-	-

Yapılan ANOVA analizleri sonuçlarına göre, numunelerin adezyon dayanımlarına en çok etki eden değişken parametrenin bias gerilimi olduğu, sonrasında çalışma basıncı ve en az etkili olan parametrenin de Zr hedef malzeme akımının olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bias gerilimi, adezyon dayanımına % 63,5 katkı oranıyla en önemli etkiye sahiptir. Zr hedef malzeme akımı % 4 ve çalışma basıncı % 24 katkı oranına sahip olmaktadır. ANOVA analizi incelemesi sonucunda en etkin parametre olarak belirlenen bias geriliminin artmasıyla nanosertlik değerlerinde de artış olduğu belirlenmiştir.

Yapılan adezyon dayanımı incelemesinde, çalışma basıncı 2×10^{-3} Torr değerinde sabit olan ve bias gerilimleri sırasıyla 50V, 75V ve 90V değerlerinde olan R1, R4 ve R7 numune grubu değerlendirildiğinde, numunelerin Lc_2 kritik yükleri sırasıyla 45N, 45N ve 80N olmaktadır. Daha önce belirtildiği gibi kaplama yoğunluğu ve sertliği bias geriliminin artması sonucunda artış göstermektedir. Bu yoğunluk ve sertlik artışı kaplama tabakasının adezyon dayanımında da bir artış sağlamaktadır. R7 numunesinin sertlik değerinin R1 ve R4'e nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı zamanda R7 numunesinin adezyon dayanımı da diğerlerinden daha yüksek olmaktadır. Aynı zamanda artan bias gerilimi kaplama işleminde iyon enerjisini artırarak taban malzeme yüzeyine daha iyi bir nüfuziyet sağlamak ve iyon bombardımanında taban malzemenin içine implantasyon oluşumu artmaktadır. Bu etkiler sayesinde kaplama tabakasının adezyon dayanımı artış göstermektedir. Sonuç olarak bias geriliminin artması sonucunda, kaplama tabakası daha

yoğun ve sert olmakta, tane boyutu küçülmekte ve bu durumlarla bağlantılı olarak adezyon dayanımı da artış göstermektedir [127, 128, 129, 130].

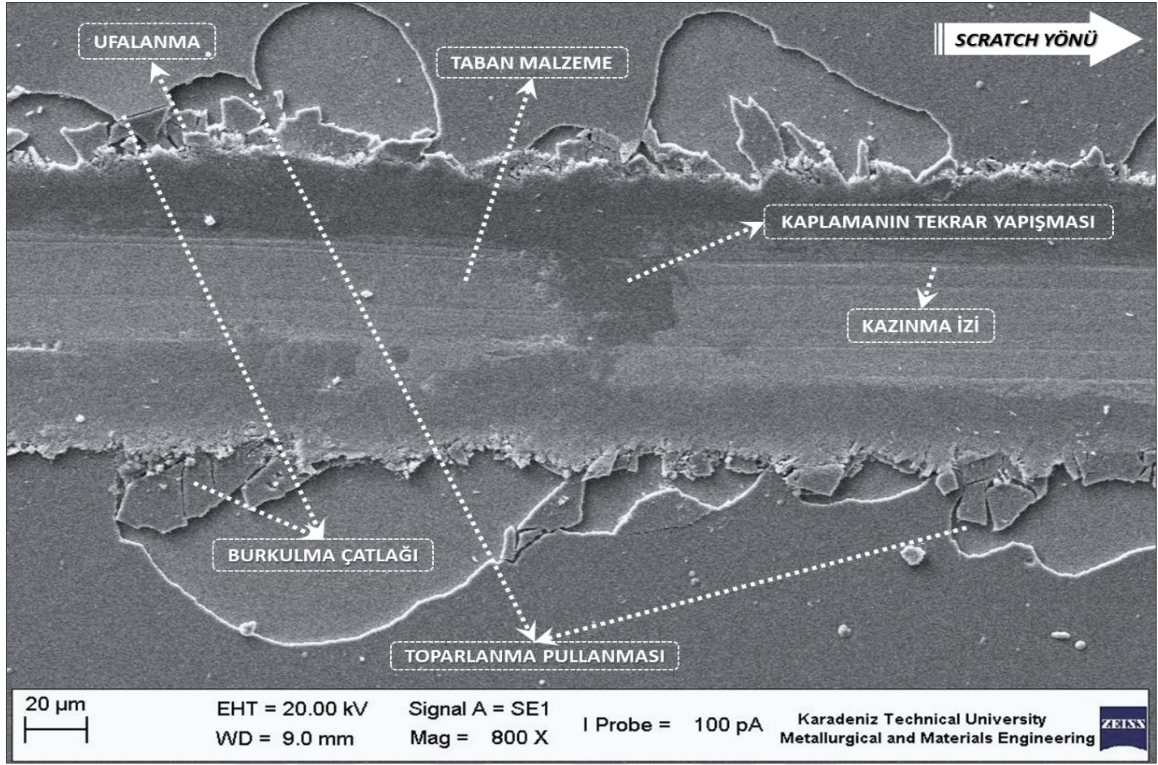
Yapılan adezyon dayanımı çalışmasında, çalışma basıncı $2,5 \times 10^{-3}$ Torr değerinde sabit olan ve bias gerilimleri sırasıyla 50V, 75V ve 90V değerlerinde olan R2, R5 ve R8 numune grubu değerlendirildiğinde, numunelerin Lc_2 kritik yükleri sırasıyla 55N, 65N ve 75N olmaktadır. Bu sonuçlara göre, bias geriliminin artması ile enerjisi yüksek iyonların taban malzeme içine implantasyonu sonucunda adezyon dayanımı artmaktadır. Numune grubunda, R8 numunesinin sertliği, bias geriliminin en büyük değerinde olduğundan dolayı en yüksektir. Bu sayede sertliği artmış olan numunenin adezyon dayanımı da yükselmiştir. R8 numunesinin aynı zamanda kaplama tabakası yapısında EDS analizlerinden belirlendiği gibi Ti ve Zr elementlerinin daha az olması adezyon dayanımının artışı ile ilişkilendirilmiştir. Şöyle ki, Zr elementinin atom boyutu diğer kaplama elementlerine oranla daha büyük olduğu için içyapıda kafes gerilmelerini artırmaktadır. İç gerilmeleri daha düşük olan R8 kaplama tabakasının daha büyük bir yük değerinde kopmasını sağlamaktadır ve adezyon direnci artmaktadır. Bu nedenle bias gerilim değeri yanında ANOVA analizlerinden Zr hedef malzeme akım değerinin etkisinin en az olduğu görülse de kaplama tabakalarının adezyon dayanımlarında alternatif bir etkiye sahip olmaktadır [112, 113, 114, 115].

Yapılan adezyon dayanımı analizlerinde, çalışma basıncı 3×10^{-3} Torr değerinde sabit olan ve bias gerilimleri sırasıyla 50V, 75V ve 90V değerlerinde olan R3, R6 ve R9 numune grubu değerlendirildiğinde, numunelerin Lc_2 kritik yükleri sırasıyla 40N, 50N ve 60N olmaktadır. Diğer numune gruplarında olduğu gibi, bu numune grubunda da bias geriliminin artmasıyla birlikte kaplamaların Lc_2 kritik yük değerlerinin de aynı zamanda arttığı görülmektedir [112, 113, 114, 115].

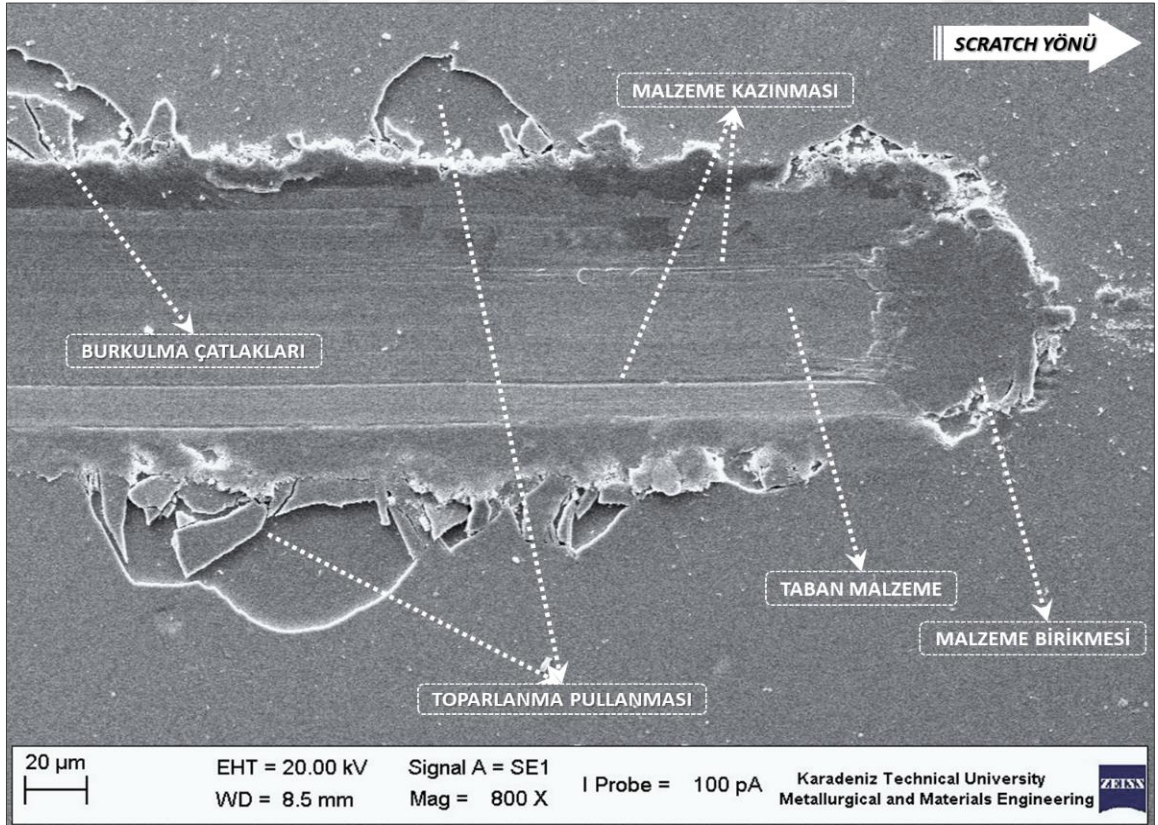
8.5.2. Çizik Testlerinin SEM Görüntüleri

Numunelerin her birinin adezyon dayanımlarının tespit edilmesi ve oluşan izlerin incelenmesi amacıyla uygulanan çizik testlerinden elde edilen çiziklerin SEM görüntüleri kullanılmaktadır. Çizik testlerinde numune kaplamalarında meydana gelen hasar mekanizmaları çizik izleri üzerinde değerlendirilerek karakterize edilmektedir.

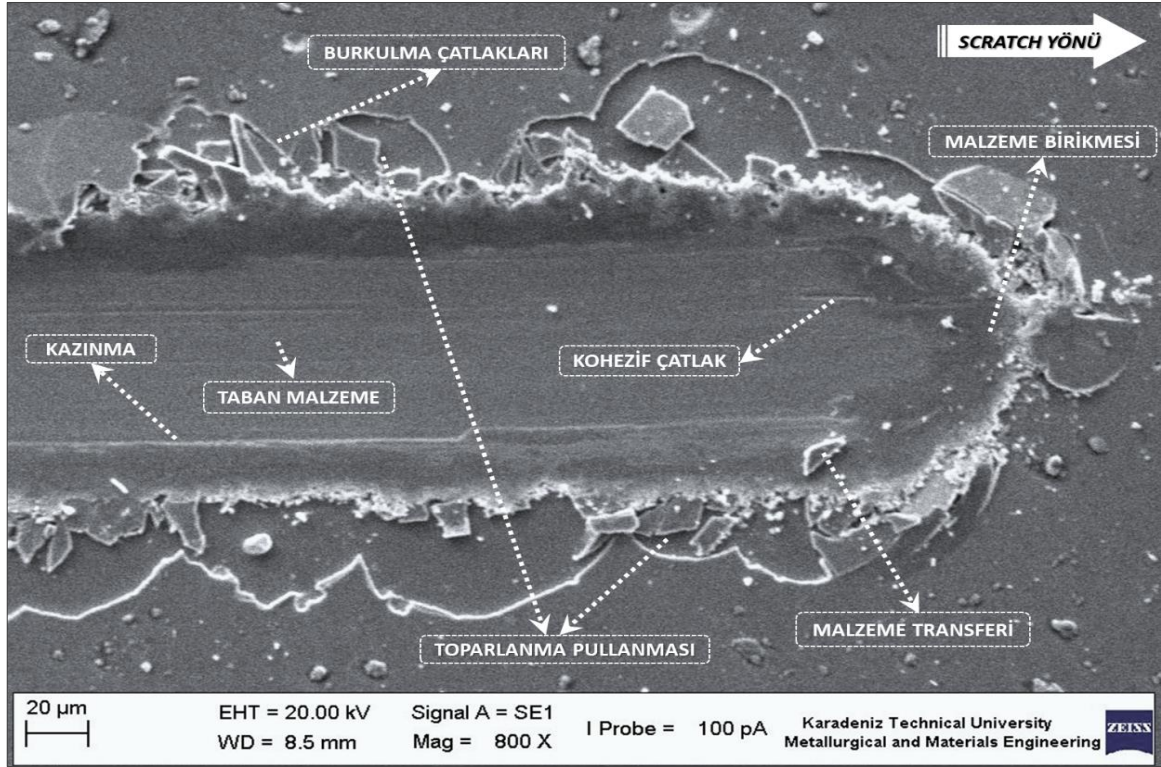
Çizik testlerinden elde edilen izlerin SEM görüntüleri ve bu görüntülerdeki çizik izlerinde meydana gelen hasar mekanizmaları Şekil 72-80'de açıklamalarıyla gösterilmektedir.



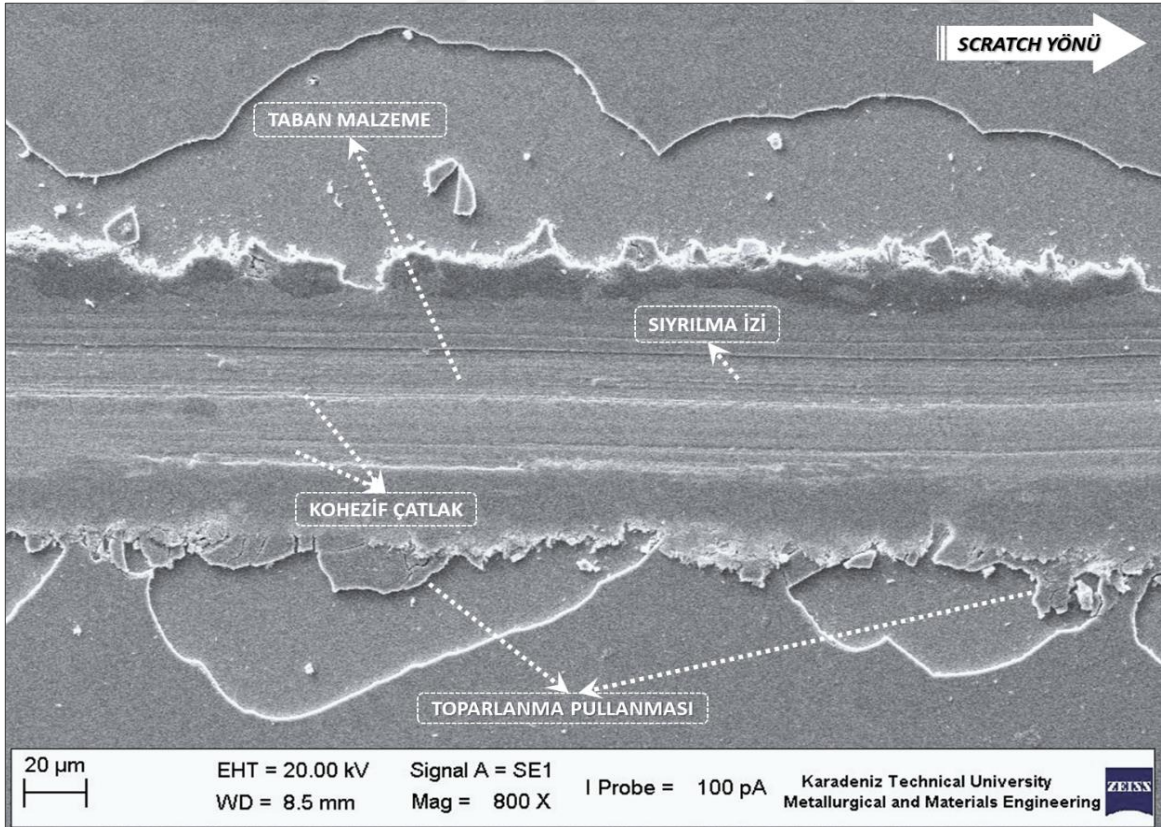
Şekil 72. R1 numunesinin scratch izi görünümü



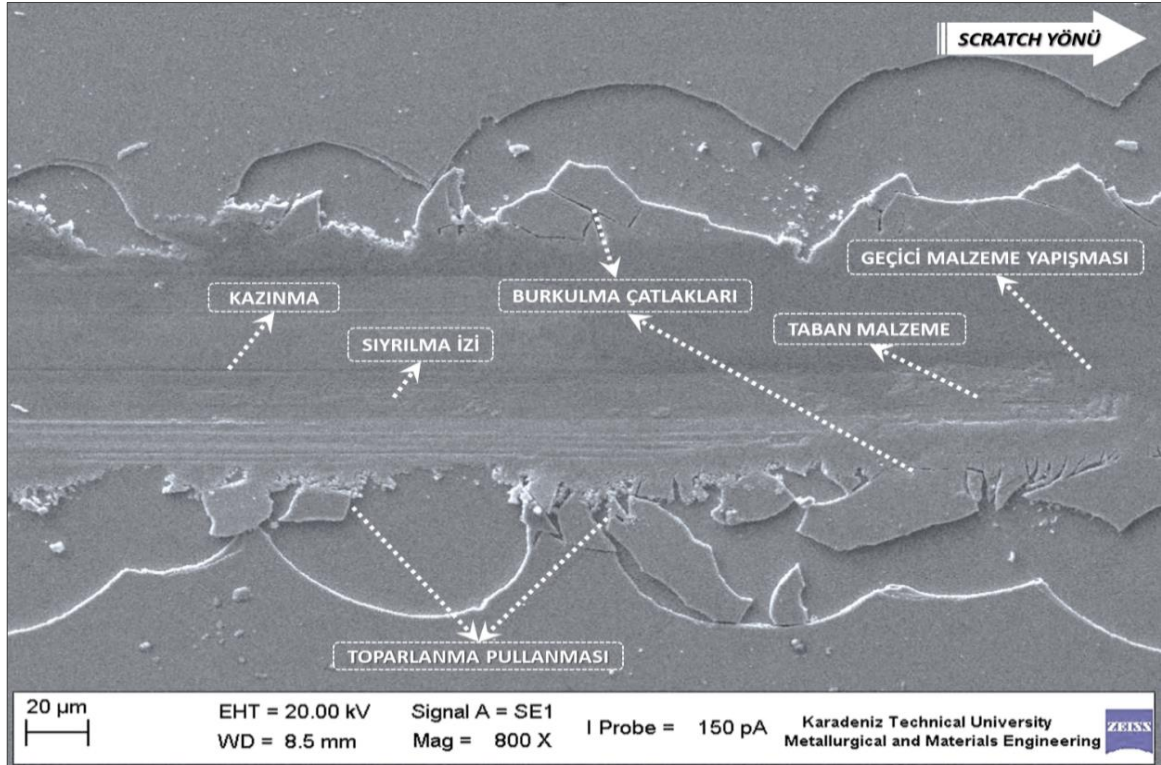
Şekil 73. R2 numunesinin scratch izi görünümü



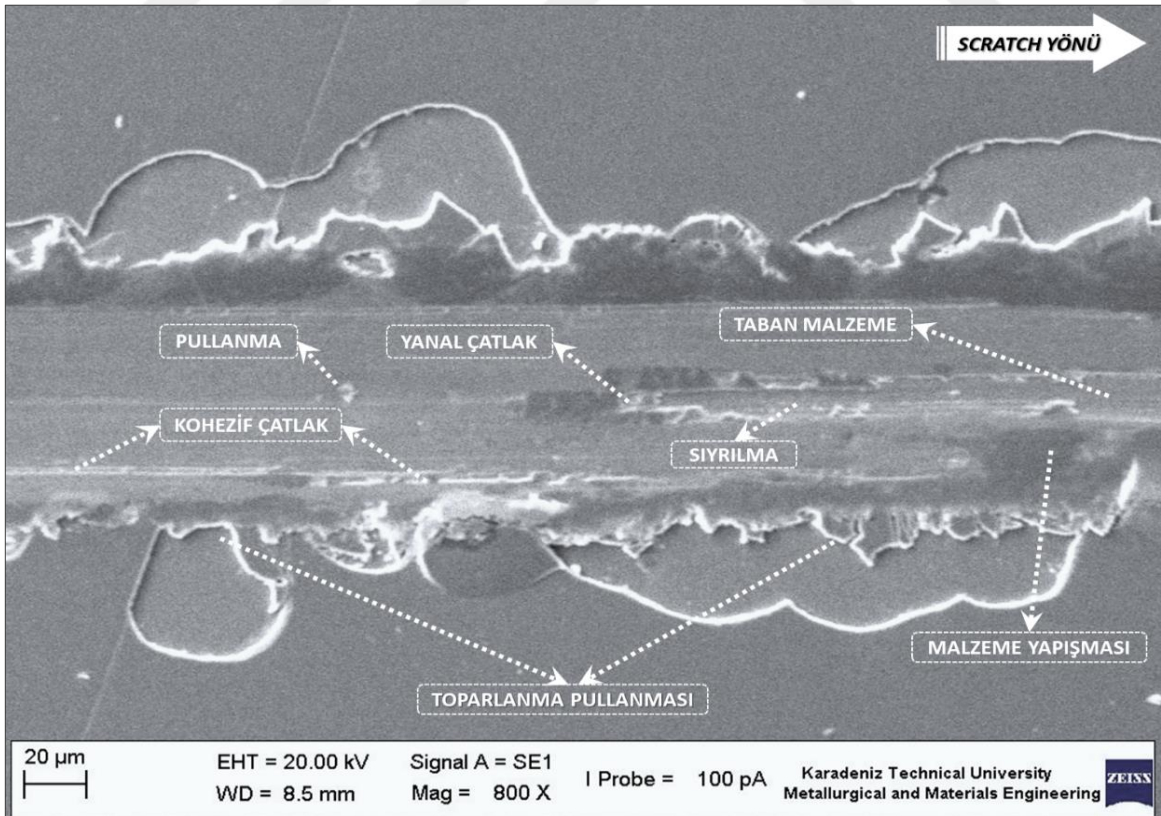
Şekil 74. R3 numunesinin scratch izi görünümü



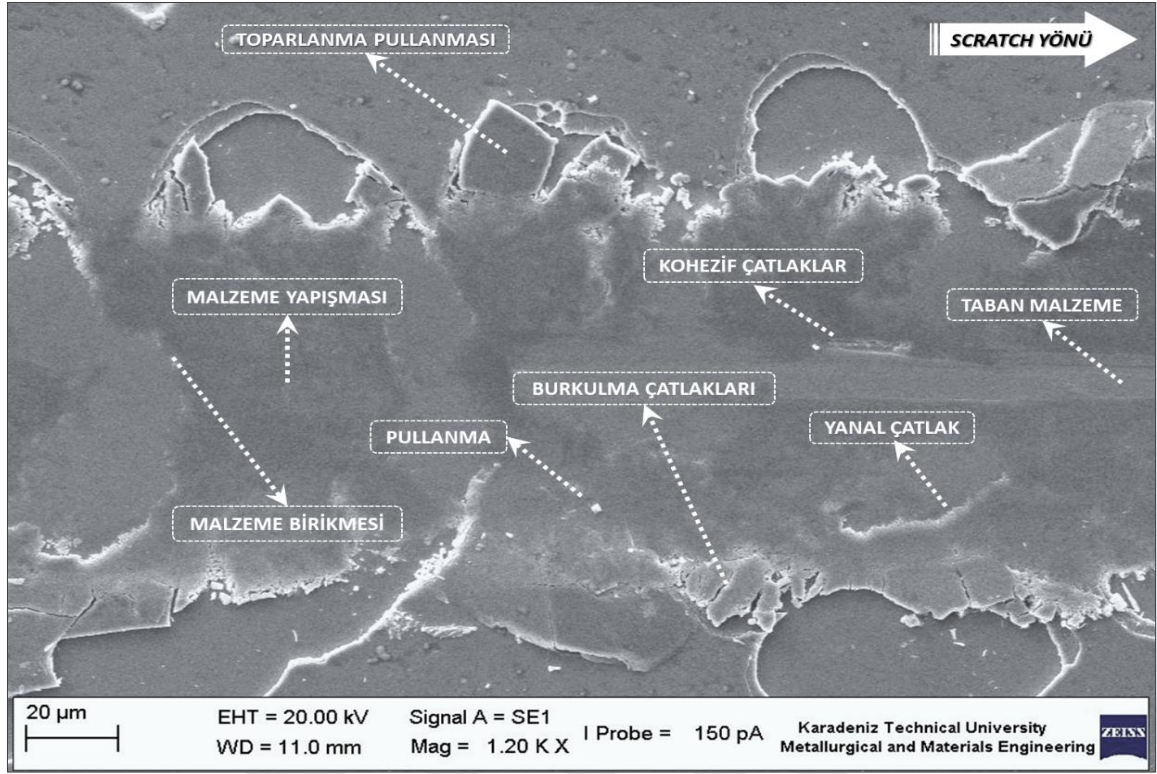
Şekil 75. R4 numunesinin scratch izi görünümü



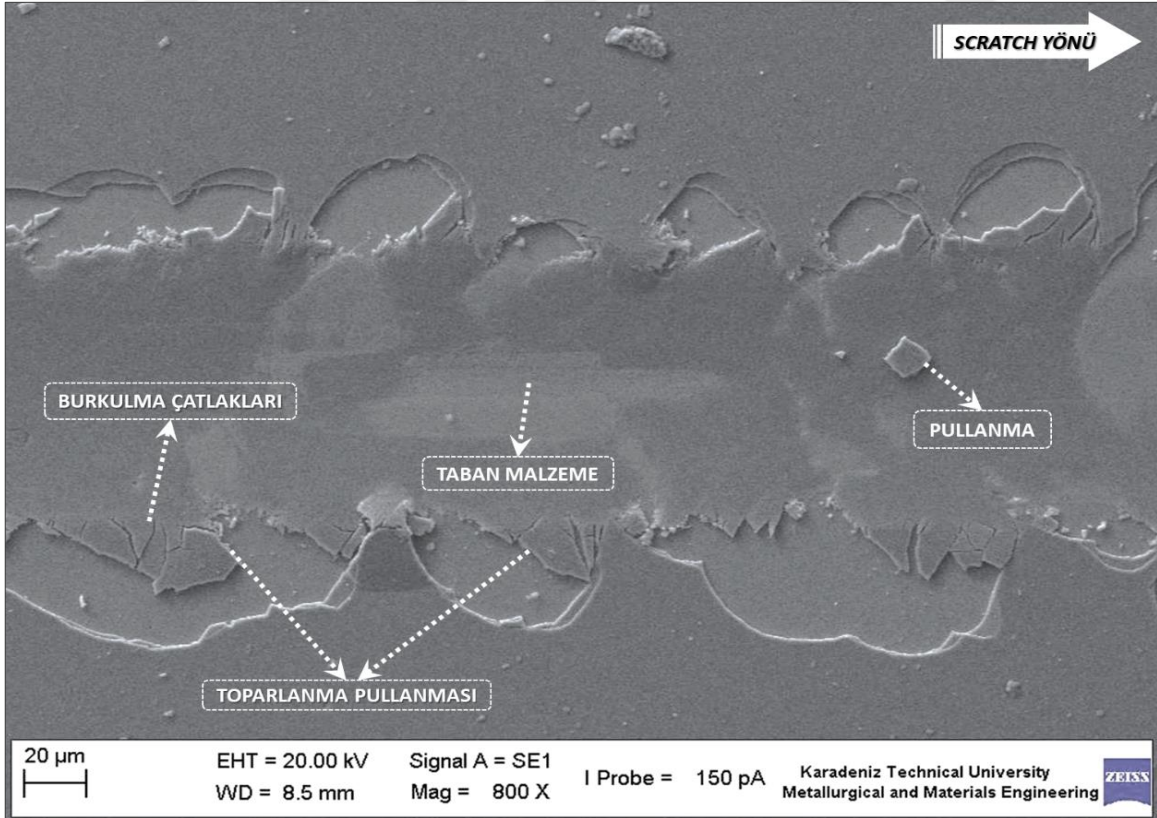
Şekil 76. R5 numunesinin scratch izi görünümü



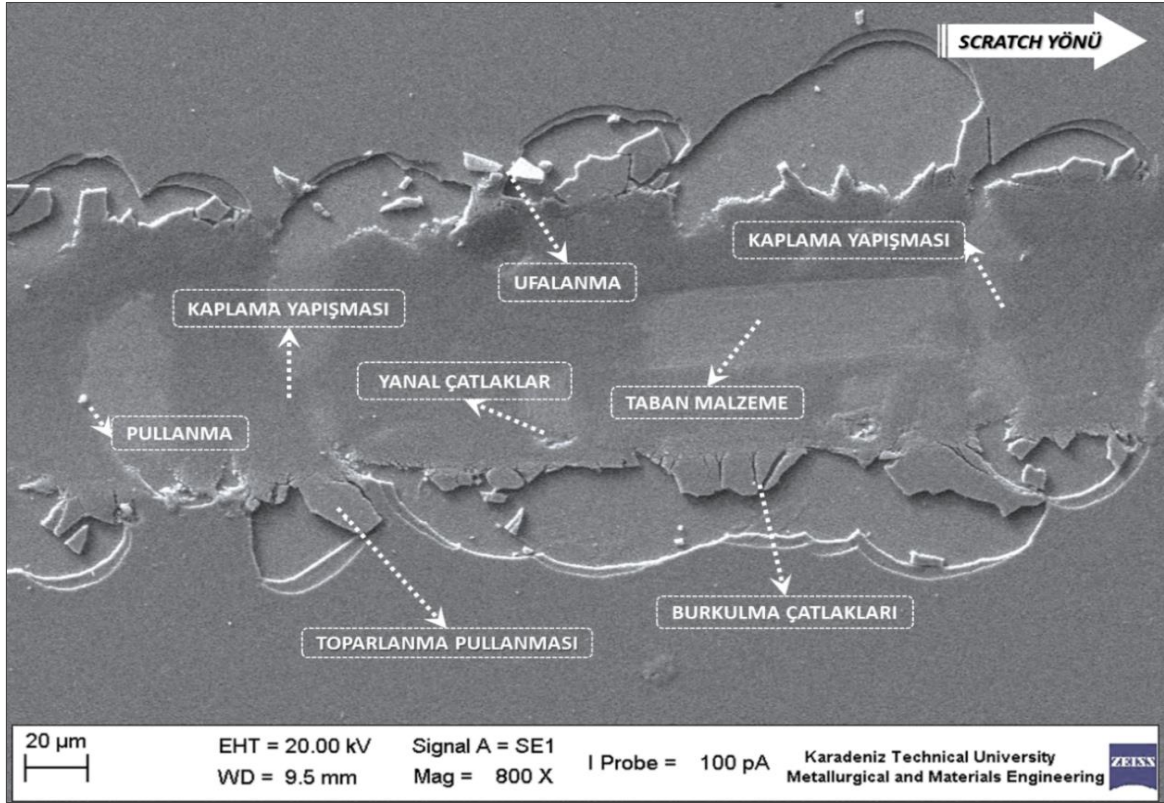
Şekil 77. R6 numunesinin scratch izi görünümü



Şekil 78. R7 numunesinin scratch izi görünümü



Şekil 79. R8 numunesinin scratch izi görünümü



Şekil 80. R9 numunesinin scratch izi görünümü

Adezyon dayanımı testlerinden numunelerin elde edilen çiziklerin SEM görüntüleri incelendiğinde, izlerde toparlanma pullanması, pullanma, ufalanma, kaplama yapışması, malzeme birikmesi, kazınma, soyulma, burkulma çatlakları, yanal çatlaklar ve kohezif çatlakların olduğu gözlemlenmektedir. Elde edilen SEM görüntülerinden de görüleceği üzere, bütün numunelerde kaplama tabakasının soyulduğu taban malzeme bölgeleri görülmektedir. Genel olarak bütün numunelerde toparlanma pullanması ve burkulma çatlakları oluşmuştur. R1, R5, R6, R7 ve R9 numunelerinde geçici malzeme yapışması meydana gelmiştir. R3, R6 ve R7 numunelerinde kayma doğrultusunda kohezif çatlaklar görülmektedir. Bu hasarlara ek olarak; R1, R2, R3 ve R5 numunelerinde kayma doğrultusunda kazınma izi; R4, R5 ve R6 numunelerinde kayma doğrultusunda sıyrılma şeritleri; R6 ve R7 numunelerinde yanal çatlaklar; R6, R7 ve R9 numunelerinde pullanma; R1 ve R9 numunelerinde ufalanma hasarları olduğu tespit edilmiştir. Kaplamalardaki çizme izinin oluşumundan meydana gelen plastik deformasyon, malzeme elastik deformasyonunu gevşetmekte ve zorlanmalar kenar bölgelerde artan yük ile toparlanma pullanması adı verilen durumu meydana getirmektedir. R1, R5, R6, R7 ve R9 numunelerinde kaplama yüzeyden sıyrılmaya başladıktan hemen sonra bir kısmı tekrar yapışma eğilimi

(kaplamanın kısa mesafelerde taşınımı) göstermiş, fakat uygulanan yükün artmasıyla bu etki ortadan kaybolup soyulan kaplamanın yüzeye tekrar yapışması mümkün olamamıştır.

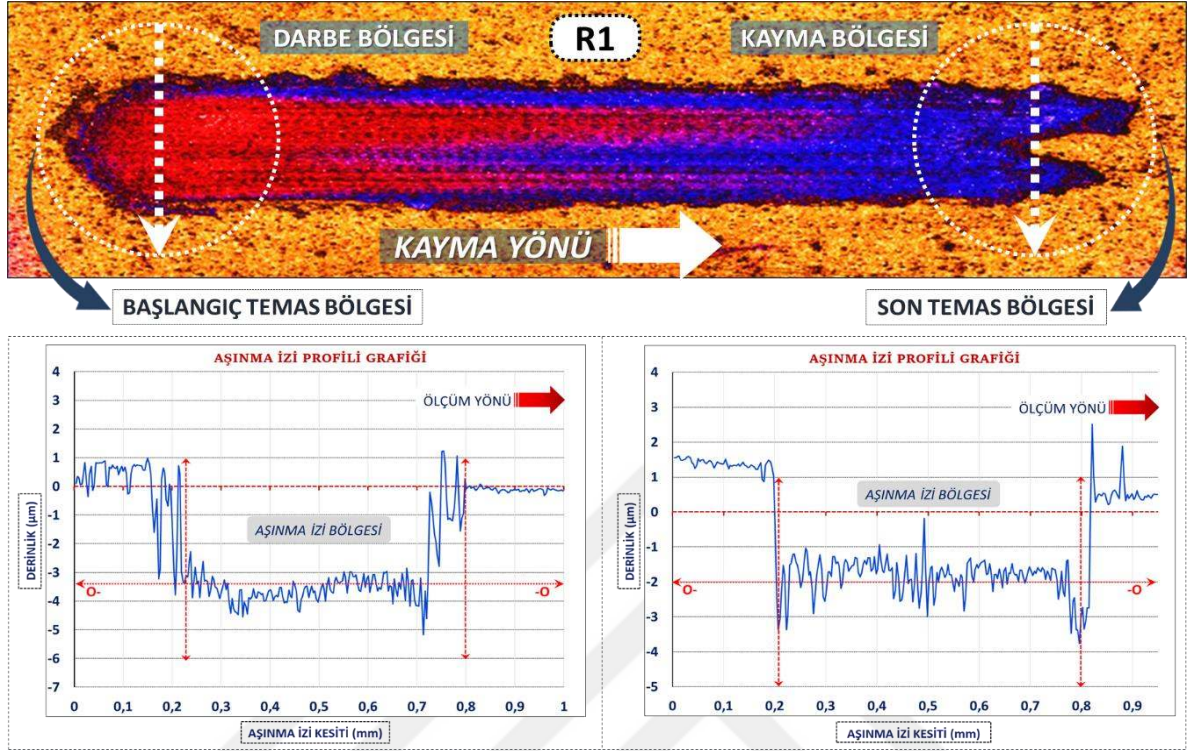
Adezyon dayanımı deneylerinde, çizik testinden elde edilen veriler ve hasar mekanizmaları değerlendirildiğinde, genel olarak bias geriliminin belirli bir değere kadar (125V) yüksek olduğu numunelerin kritik yük değeri de yüksek olmakta ve adezyon dayanımları daha iyi olarak değerlendirilmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, 125V değerinden fazla uygulanan bias gerilim değerlerinde adezyon dayanımları aniden düşüş yaşandığı kaydedilmektedir. Bu çalışmada çalışma basıncı değerleri bu bilgiler ışığında 50V-75V-90V olarak seçilmiştir. Ayrıca, çalışma basıncı daha düşük olan numunelerin kritik yük değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir.

Kaplama tabakasında iç gerilmeler meydana gelmektedir. Bu iç gerilmelerin sebepleri; taban malzeme ve kaplama tabakası arasındaki ısı genleşme katsayısı farkı, kaplama tabakasındaki atomlar arası boşluklar, mikroskobik boşluklar ve dislokasyonlar, yeniden kristalleşme ve faz dönüşümleri gibi faktörler olabilmektedir. TiAlZrN kaplamaların dereceli olarak uygulanmasının nedeni, taban malzeme ve kaplama tabakası arasındaki farkı en aza indirecek bir geçiş sağlanarak bu iç gerilmeleri azaltmaktır [116, 117]. Çalışmada uygulanan nitrürleme ve dubleks kaplama uygulaması sayesinde kaplama tabakalarının adezyon dayanımlarına katkı sağlanmıştır. Nitrürleme işlemi hem yüzey pürüzlülüğünü artırmakta hem de adezyon kuvvetini iyileştirmektedir. Ayrıca nitrürlenmiş taban malzemenin sertlik değeri arttığından, nitrürleme işlemi ile adezyon dayanımını belirleyen kritik yük değerinde de artış olmaktadır [118, 119].

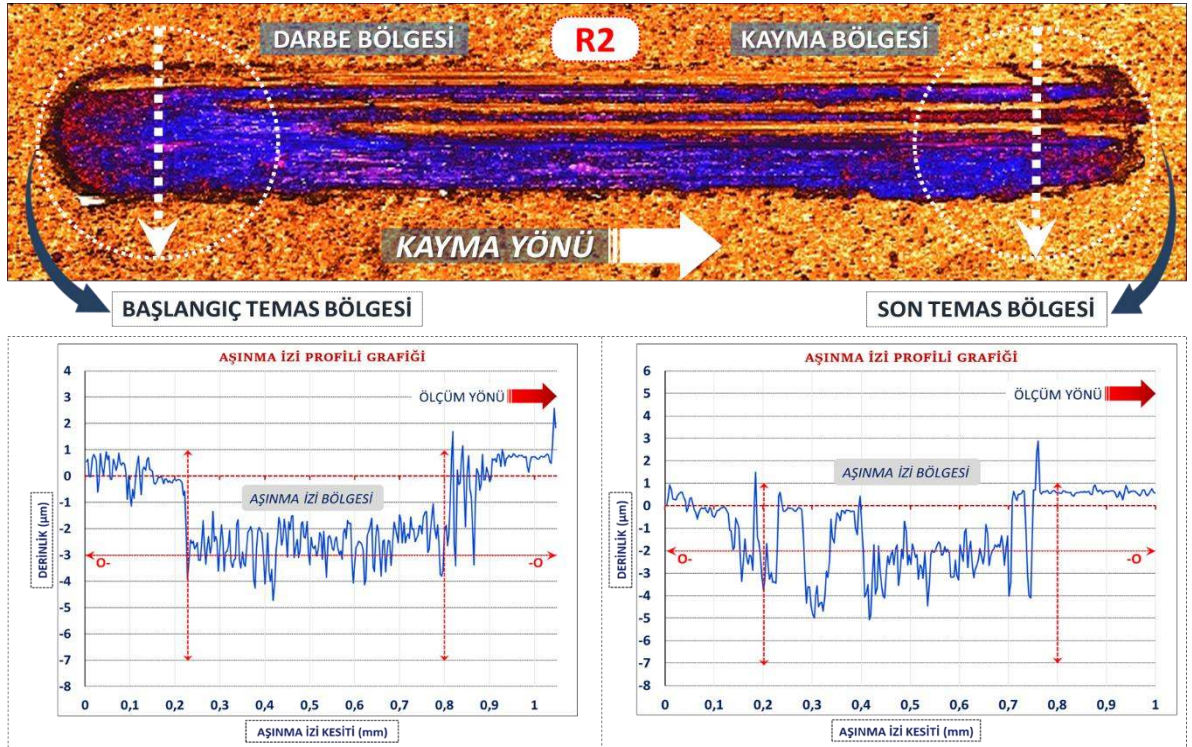
8.6. Aşınma Deneyi Sonuçları

Numunelere uygulanan darbeli-aşınma testlerinden sonra oluşan aşınma izlerinden temassız optik profilometre ile elde edilen yüzey görünümleri ve aşınma izi profili grafikleri Şekil 81-90'da verilmektedir. Şekil 81-90'da verilen şekillerde aşınma izi boyunca aşınma izi profili grafikleri, dokuz farklı numune ve taban malzemeye ait her bir iz için hem darbe bölgesi için hem de kayma bölgesi için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Şekil 91-93'de verilen gruplandırılmış grafikler, bias gerilim değerinin sabit olduğu numune grupları için aşınma değerlerinin kıyaslanması adına birlikte verilmiş aşınma izi profili grafikleridir. Şekil 94'te verilen grafikler ise, bütün numunelerin ve taban malzemenin aşınma izi boyunca belirlenen aşınma izi profilleri grafikleridir.

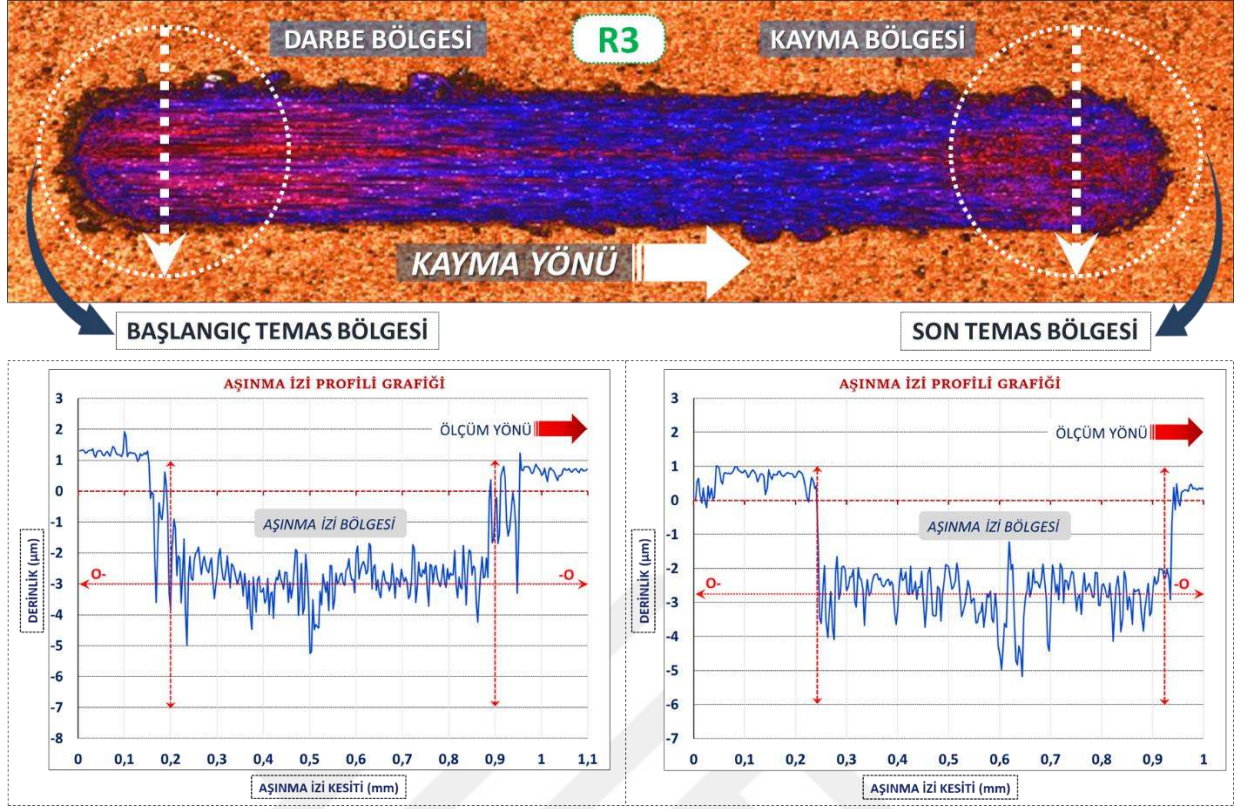
8.6.1. Profilometre Analizleri



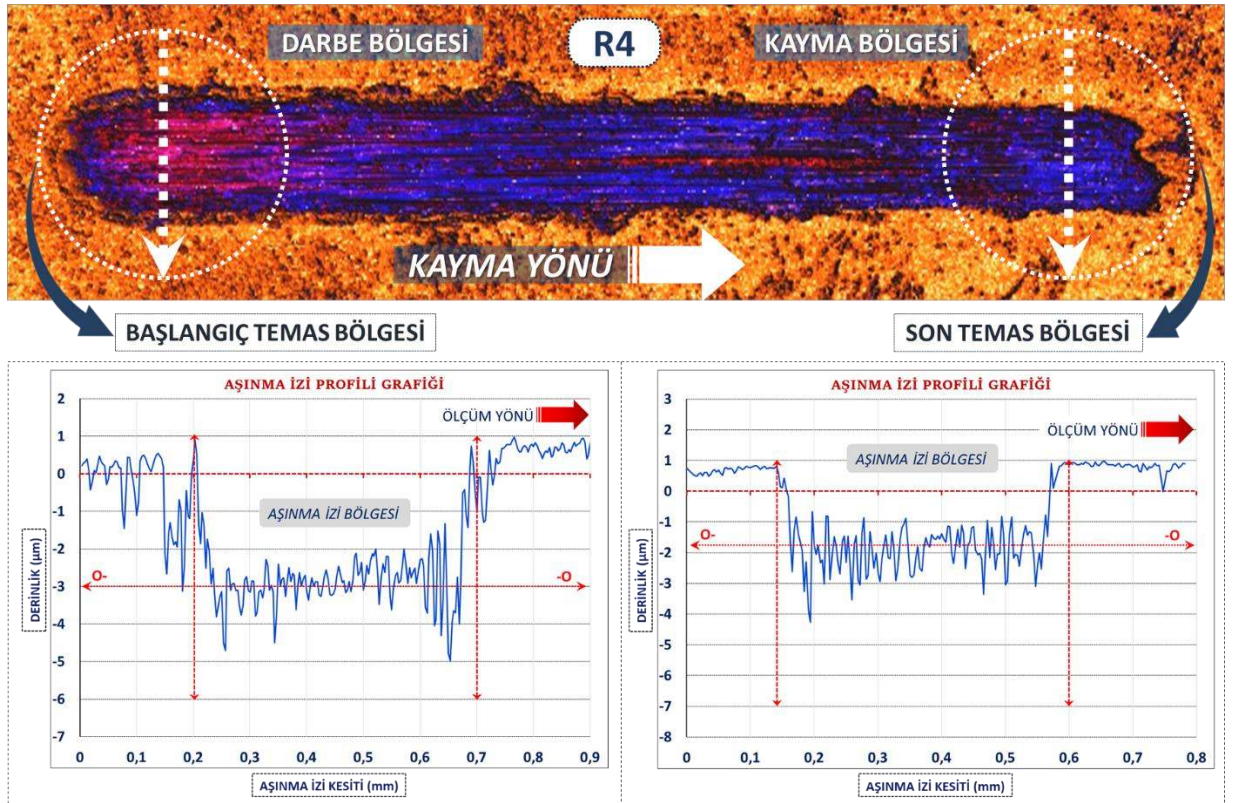
Şekil 81. R1 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



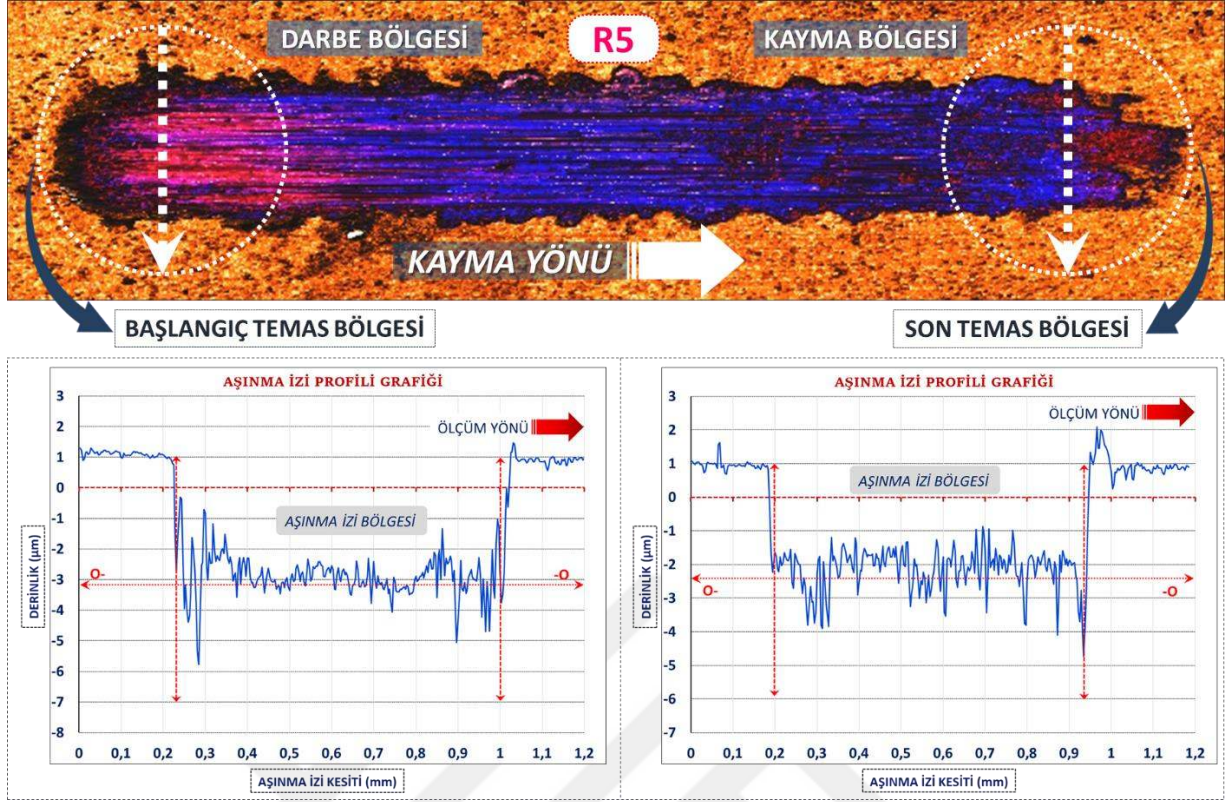
Şekil 82. R2 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



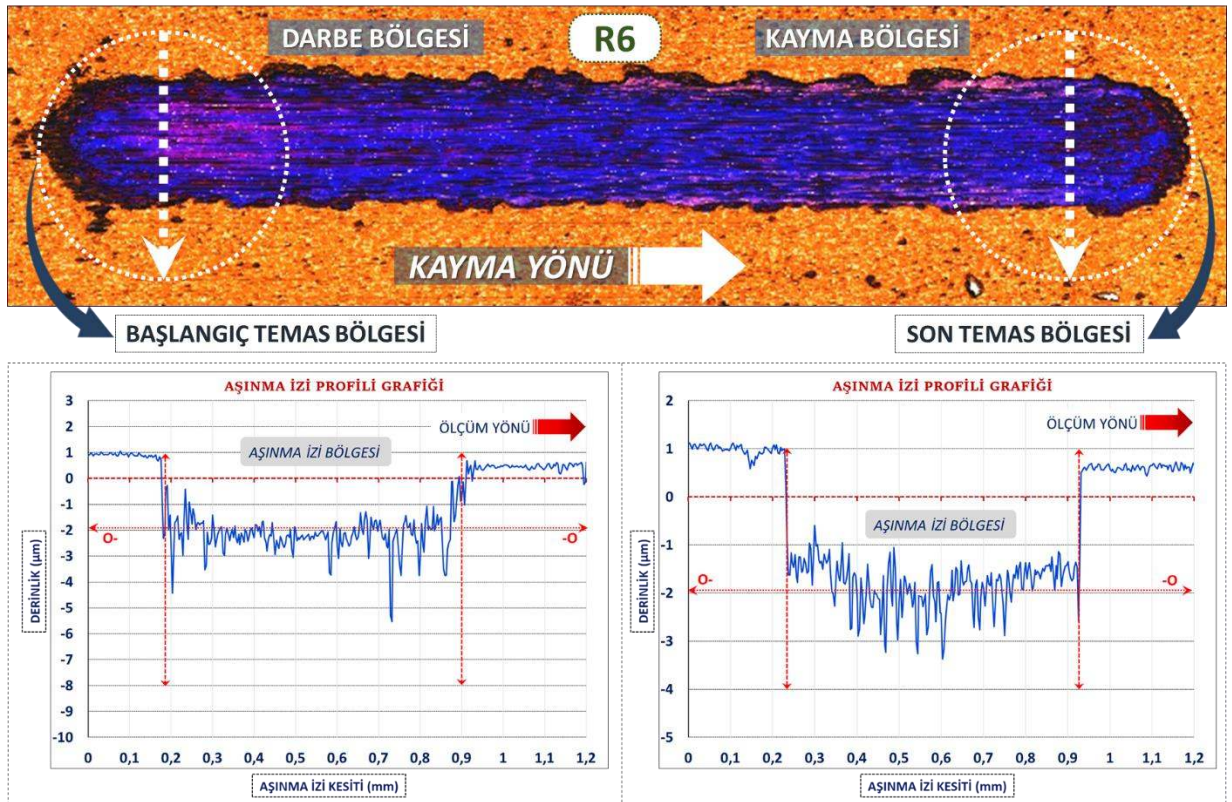
Şekil 83. R3 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



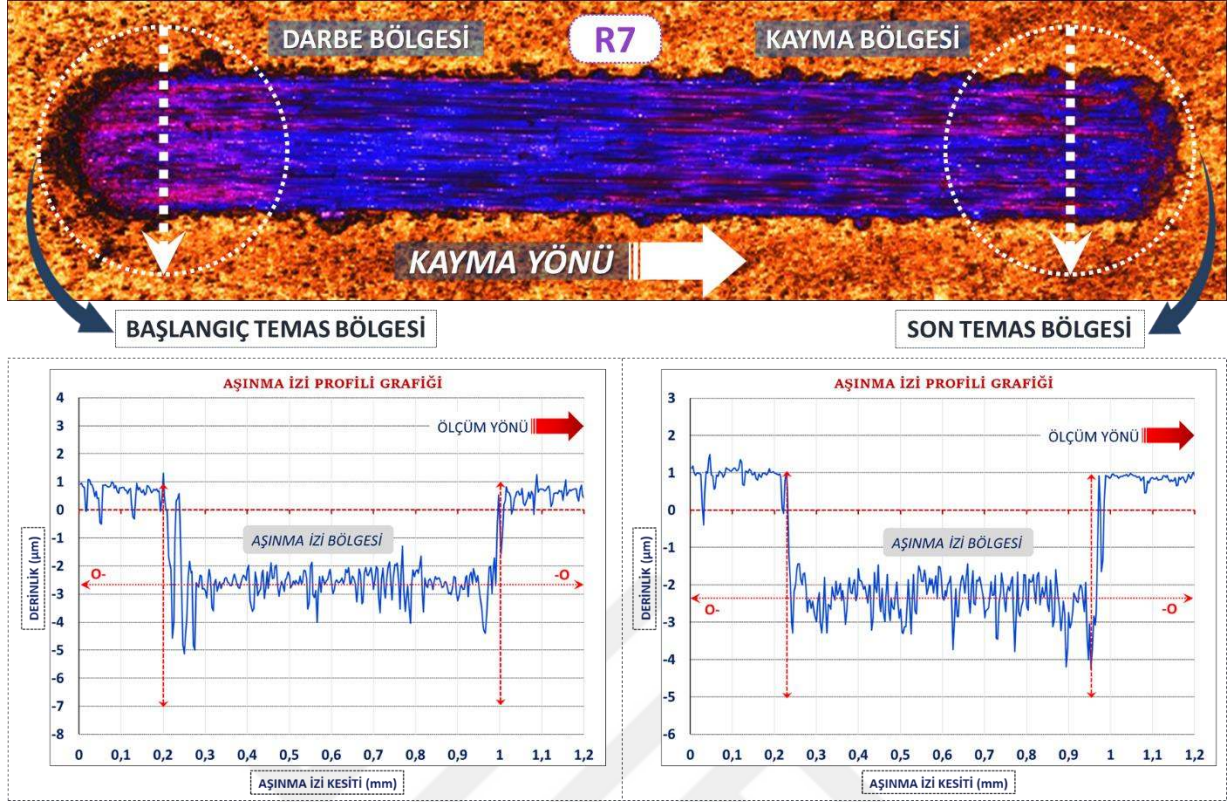
Şekil 84. R4 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



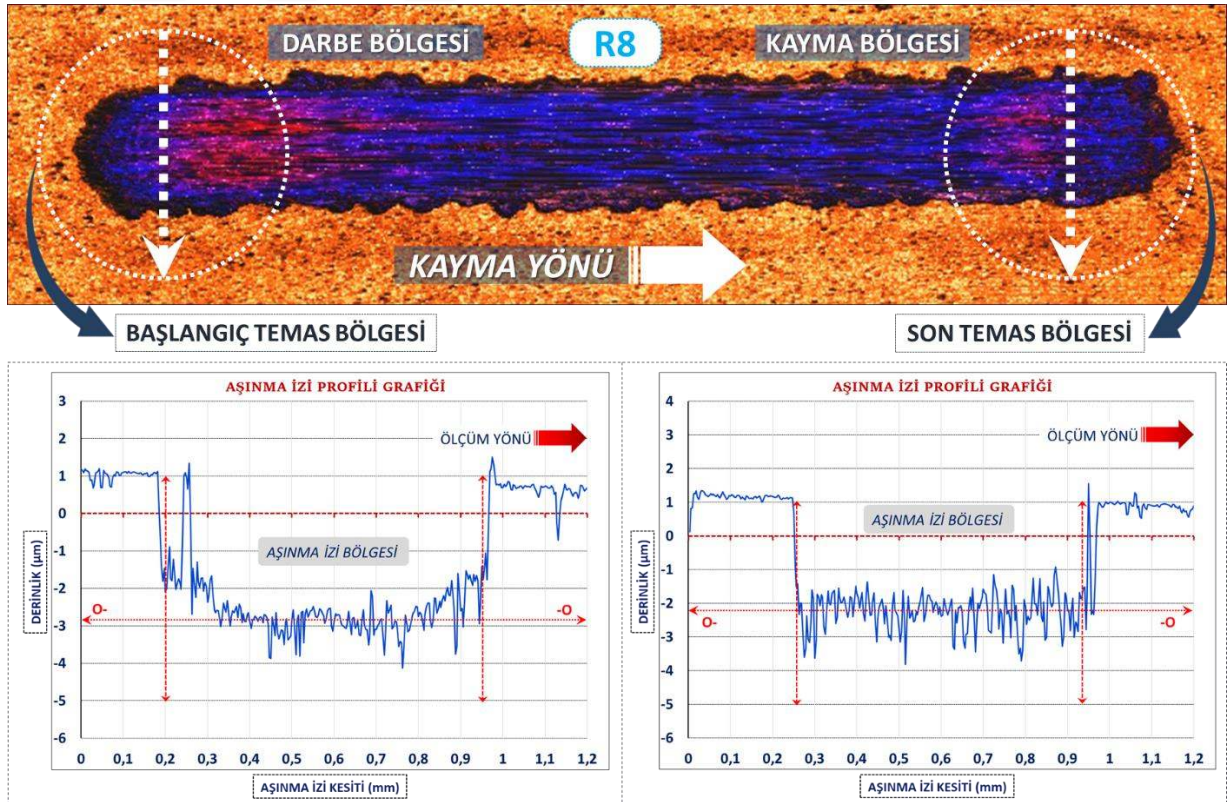
Şekil 85. R5 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



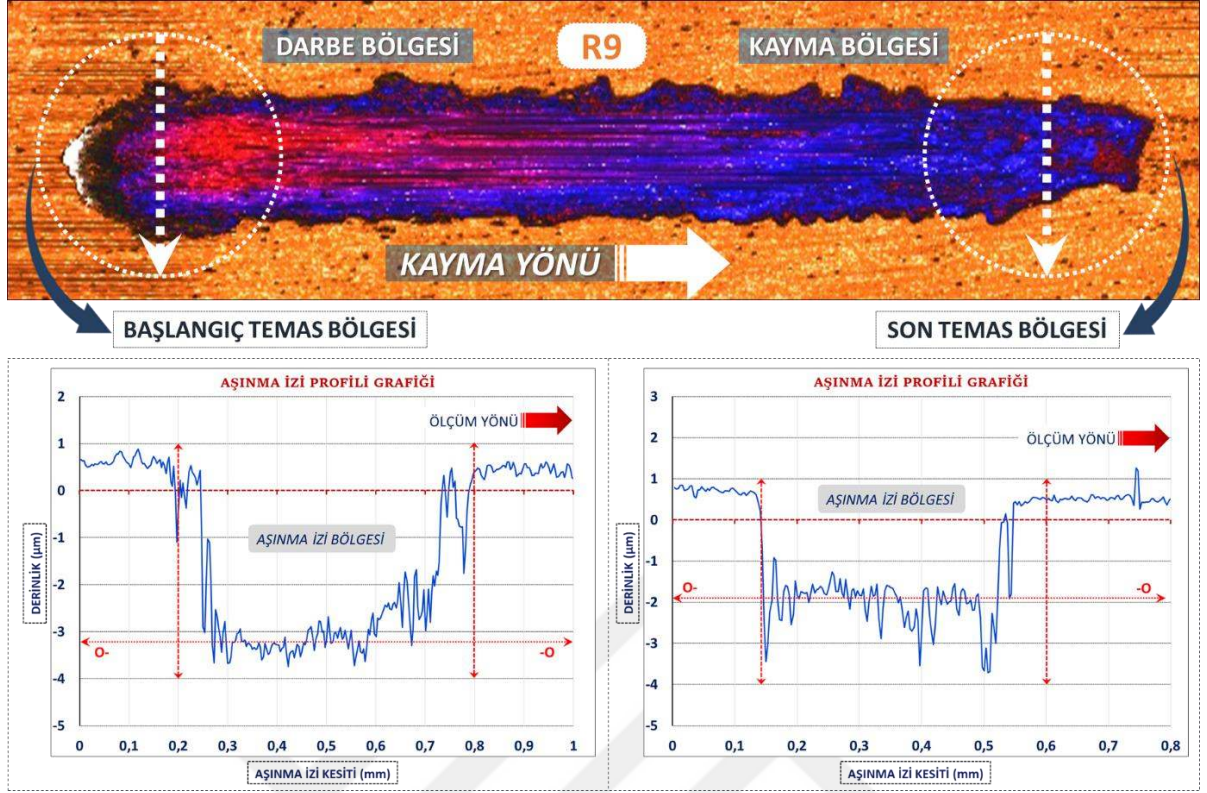
Şekil 86. R6 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



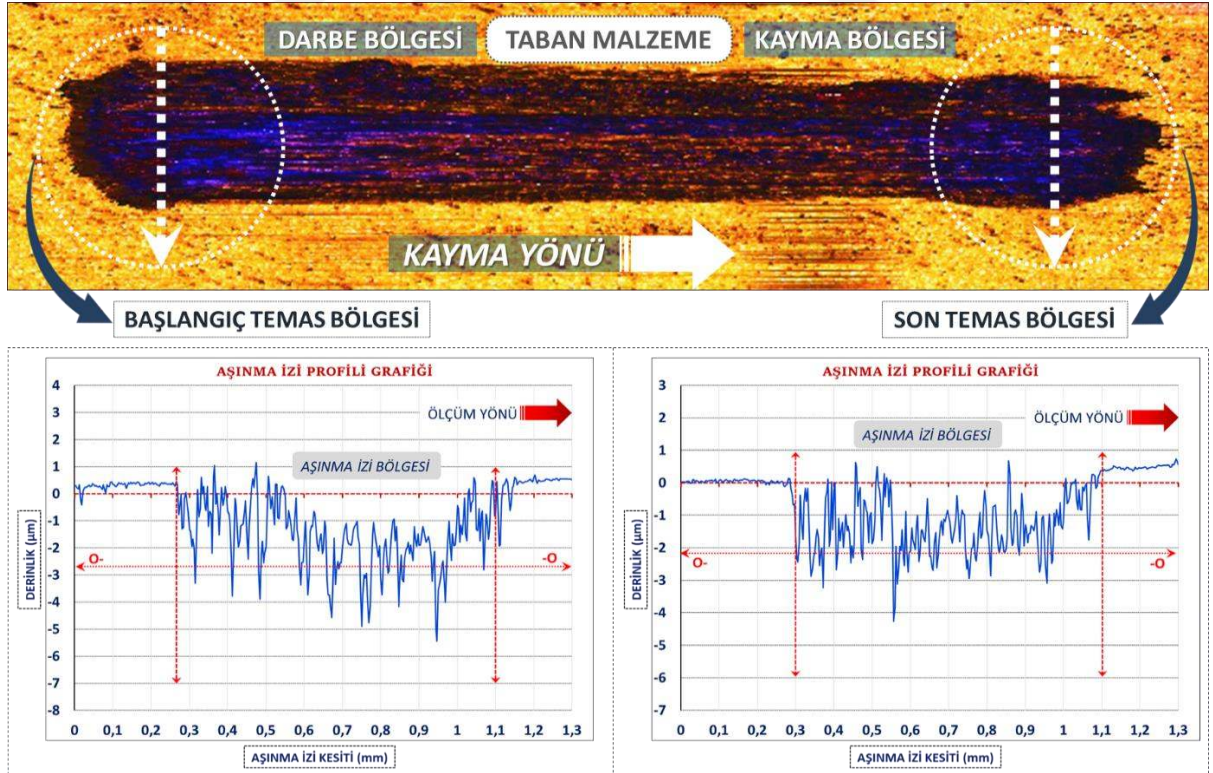
Şekil 87. R7 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



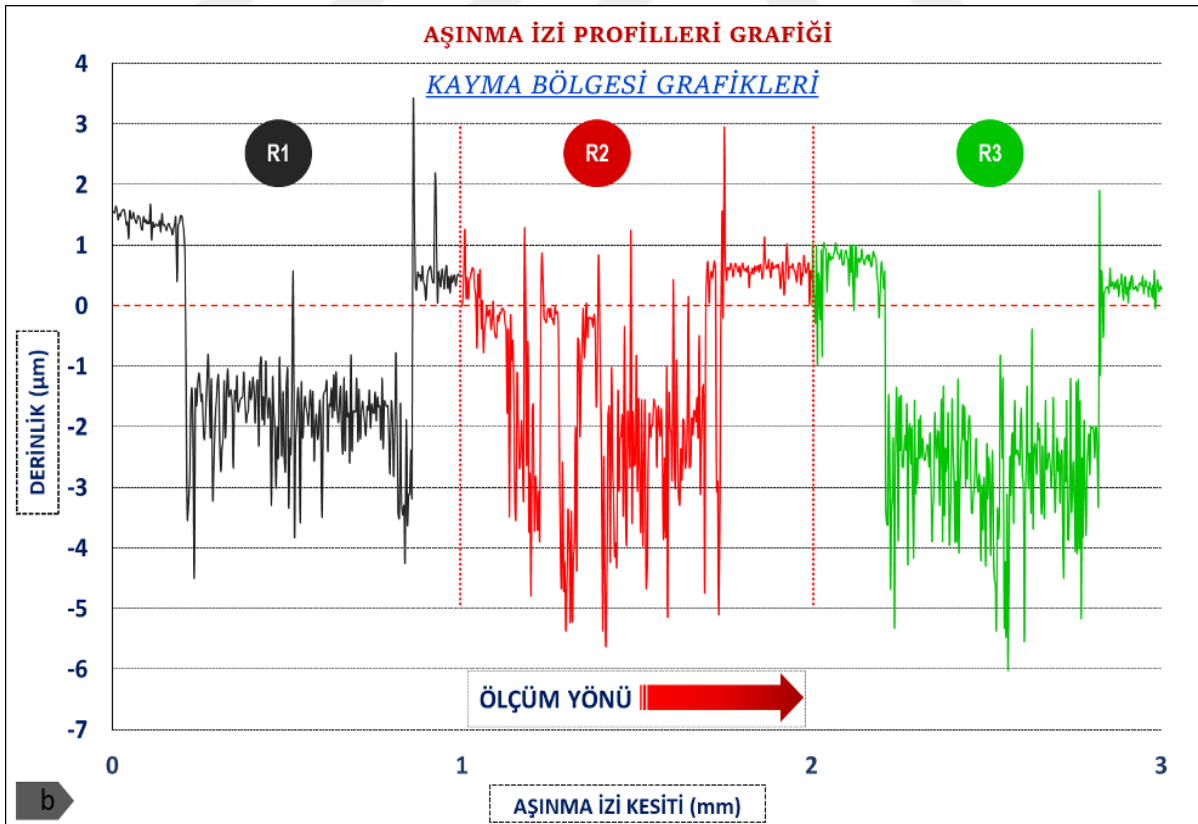
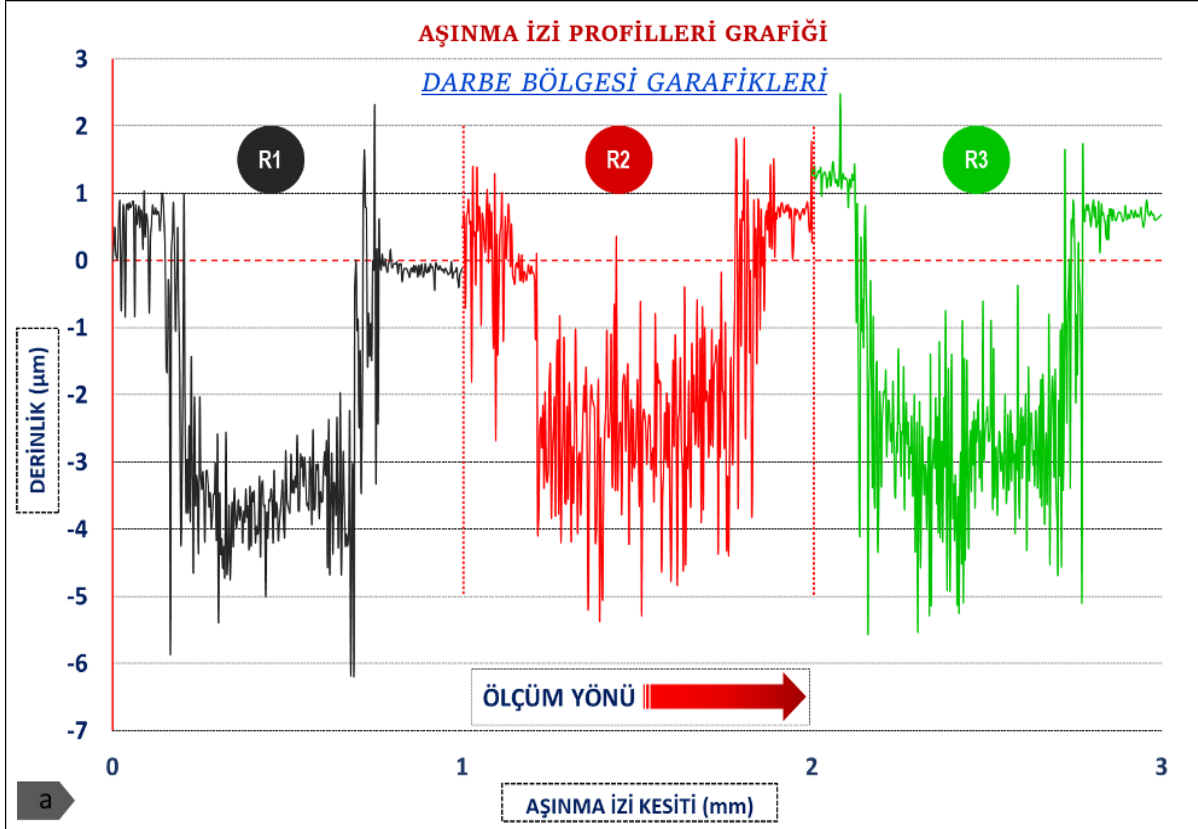
Şekil 88. R8 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



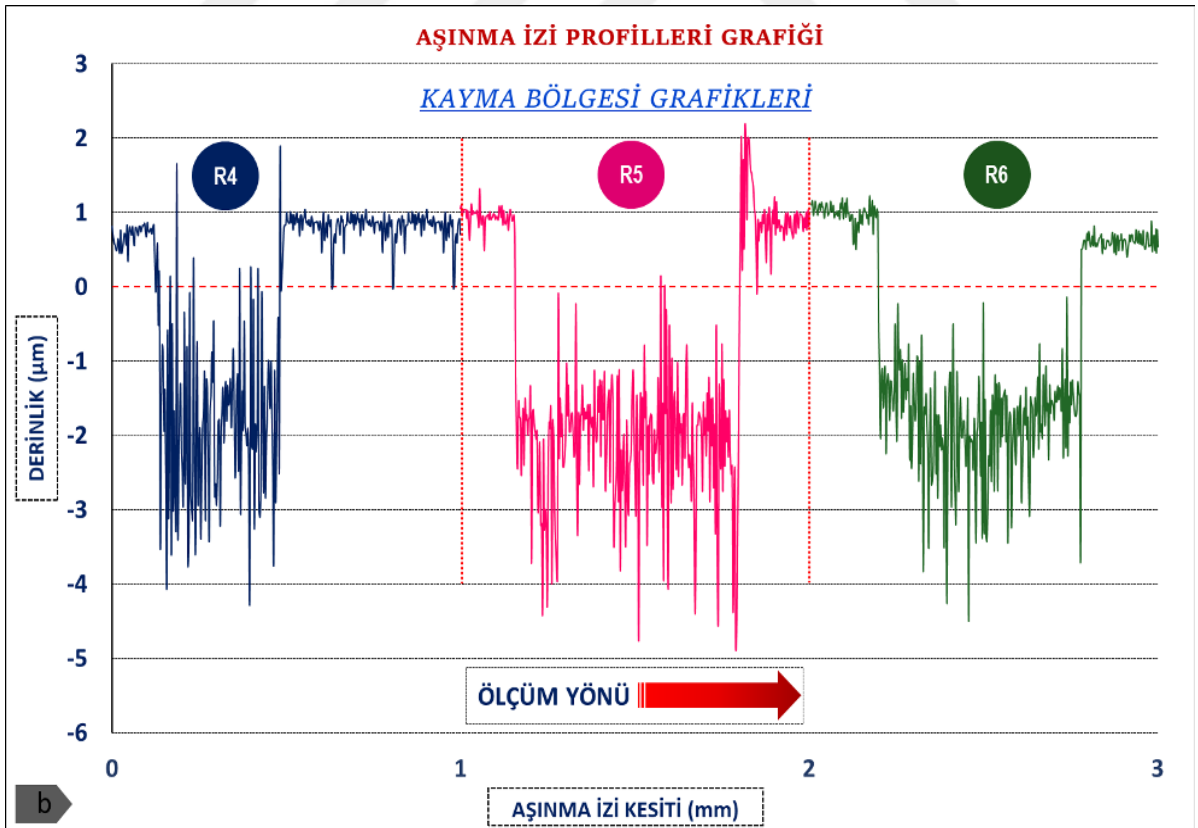
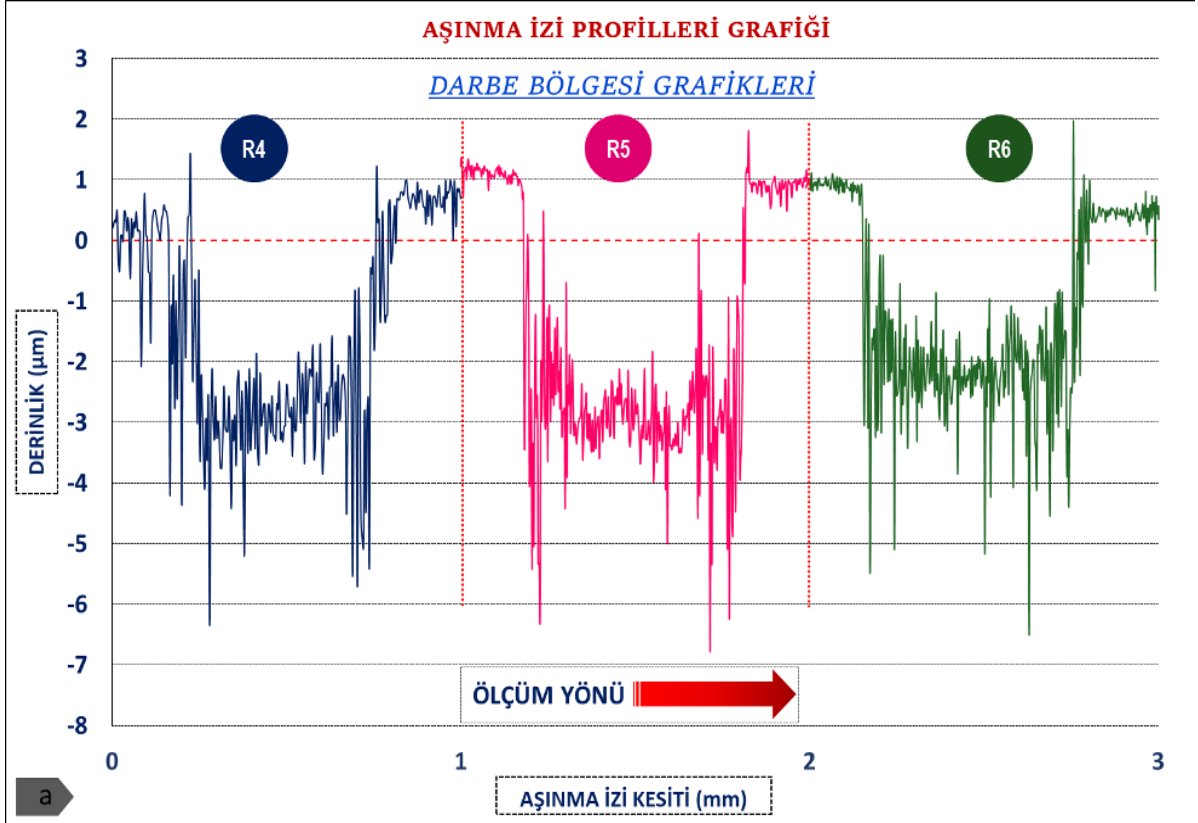
Şekil 89. R9 numunesinin profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



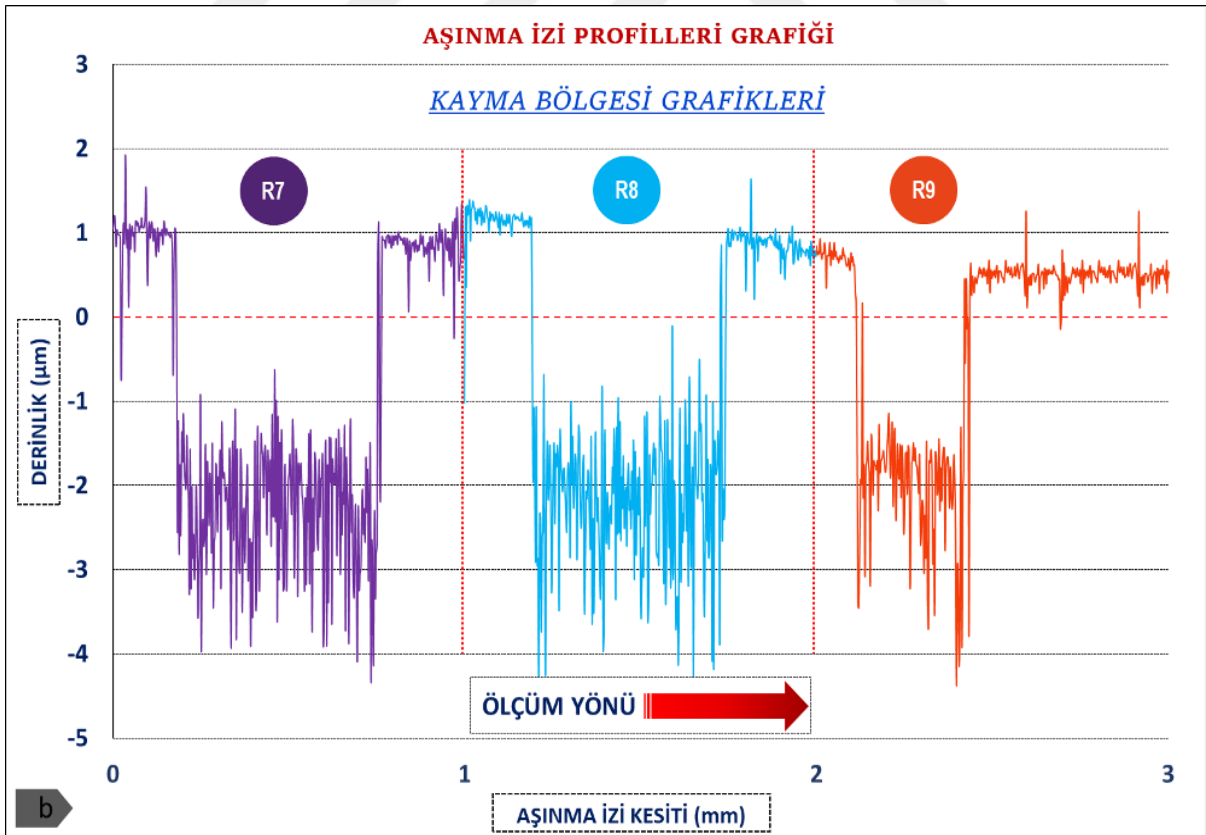
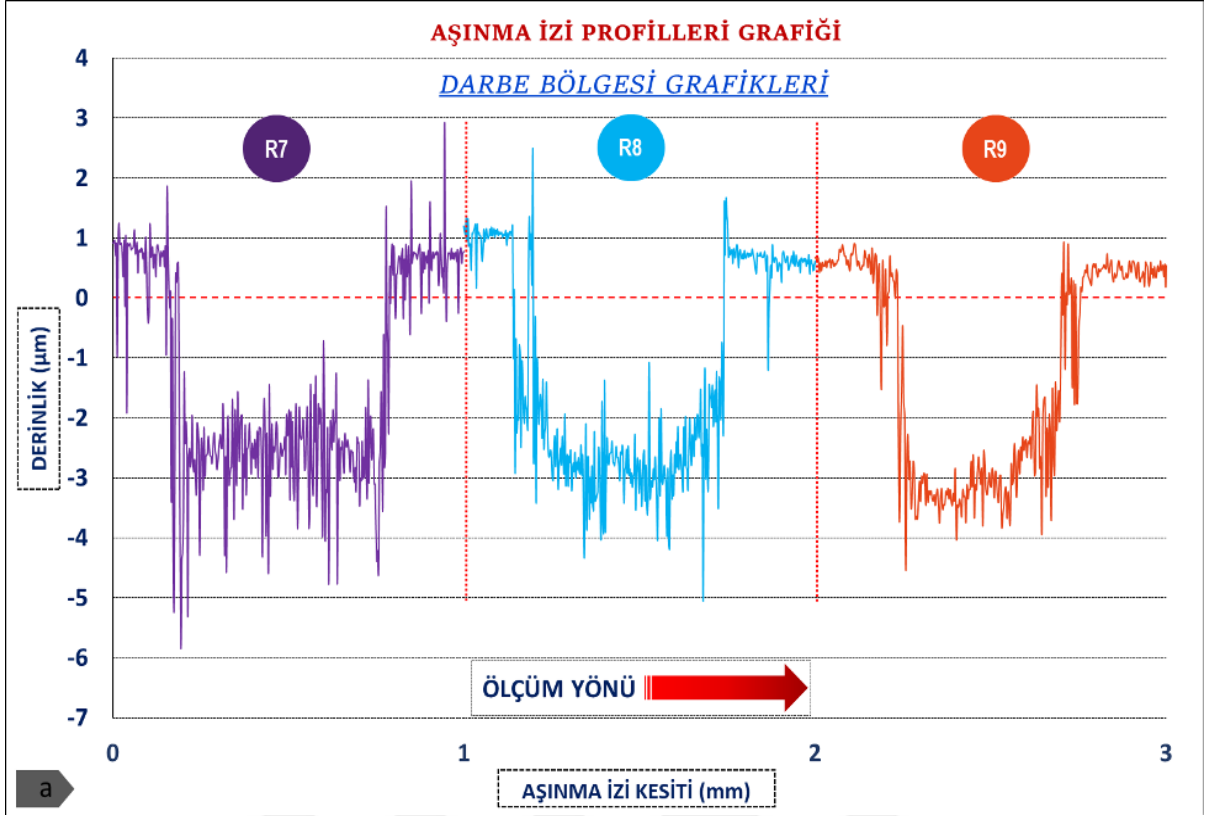
Şekil 90. Taban malzemenin (işlemsiz numune) profilometre yüzey taraması görünümü ve aşınma izi grafikleri



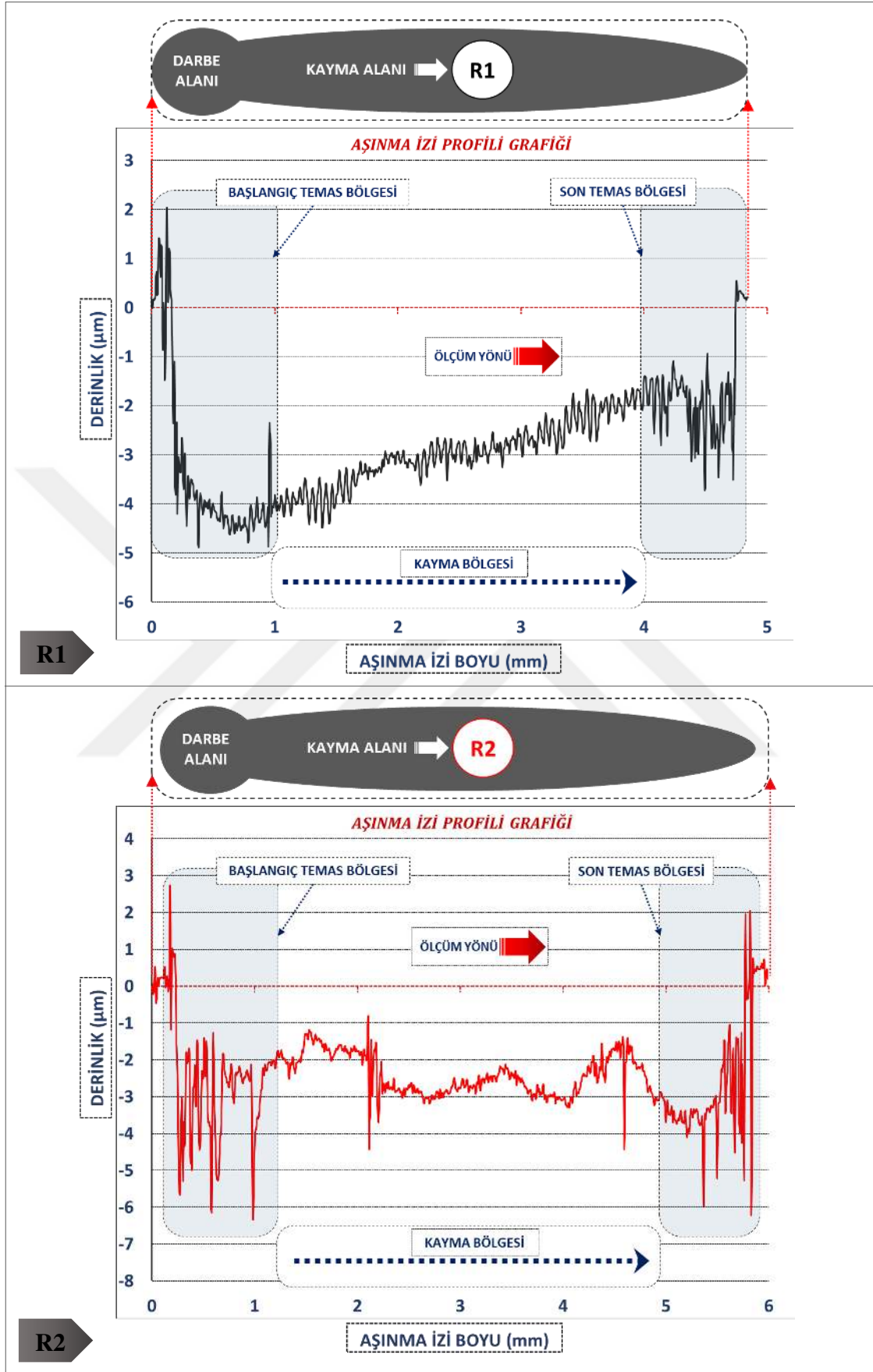
Şekil 91. R1 - R2 - R3 numunelerinin karşılaştırmalı aşınma izi profilleri; **a)** Darbe bölgesi, **b)** Kayma bölgesi



Şekil 92. R4 - R5 - R6 numunelerinin karşılaştırmalı aşınma izi profilleri; **a)** Darbe bölgesi, **b)** Kayma bölgesi

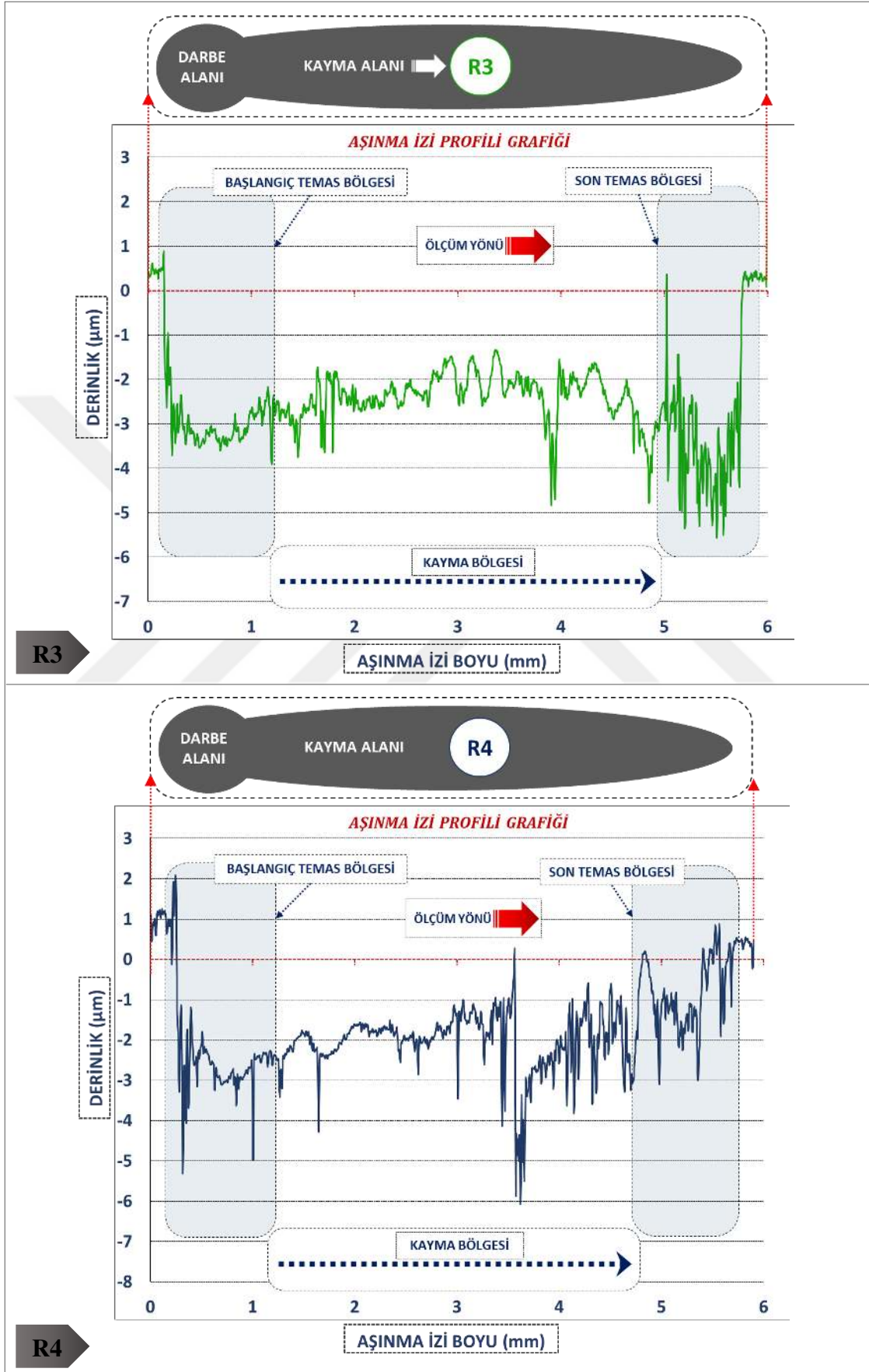


Şekil 93. R7 - R8 - R9 numunelerinin karşılaştırmalı aşınma izi profilleri; a) Darbe bölgesi, b) Kayma bölgesi

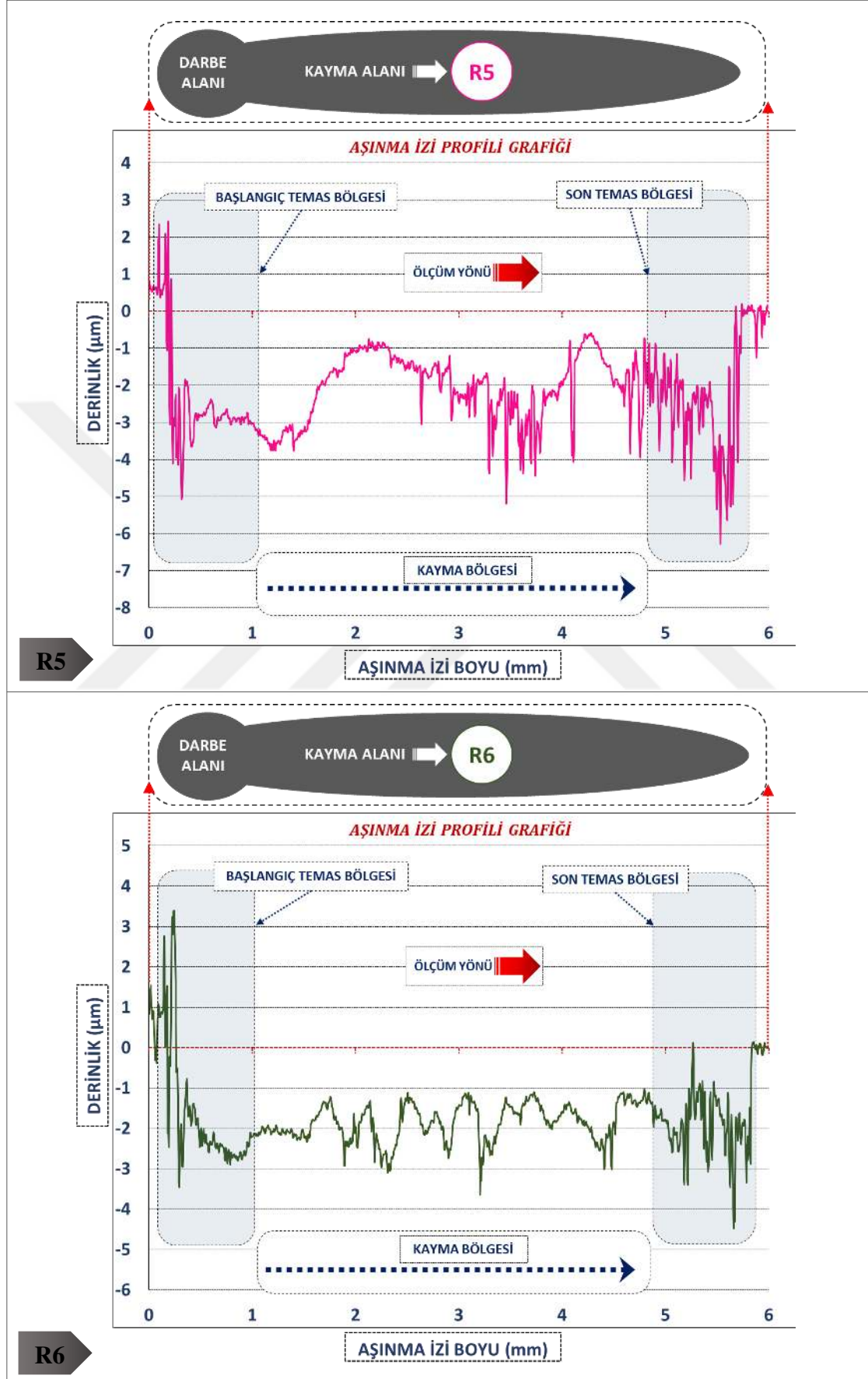


Şekil 94. Numunelerin aşınma izleri boyunca aşınma izi profili grafikleri

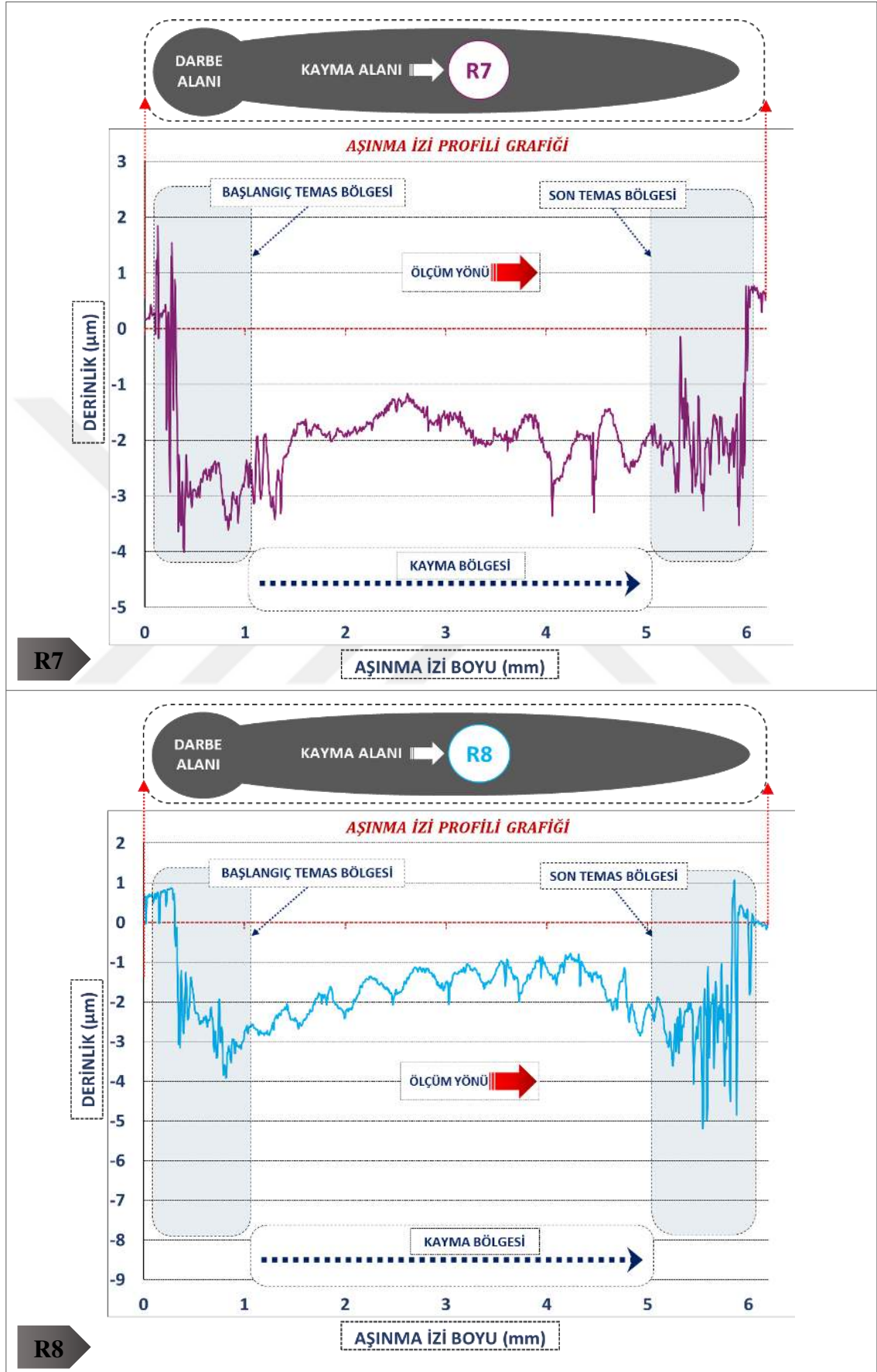
Şekil 94'ün devamı



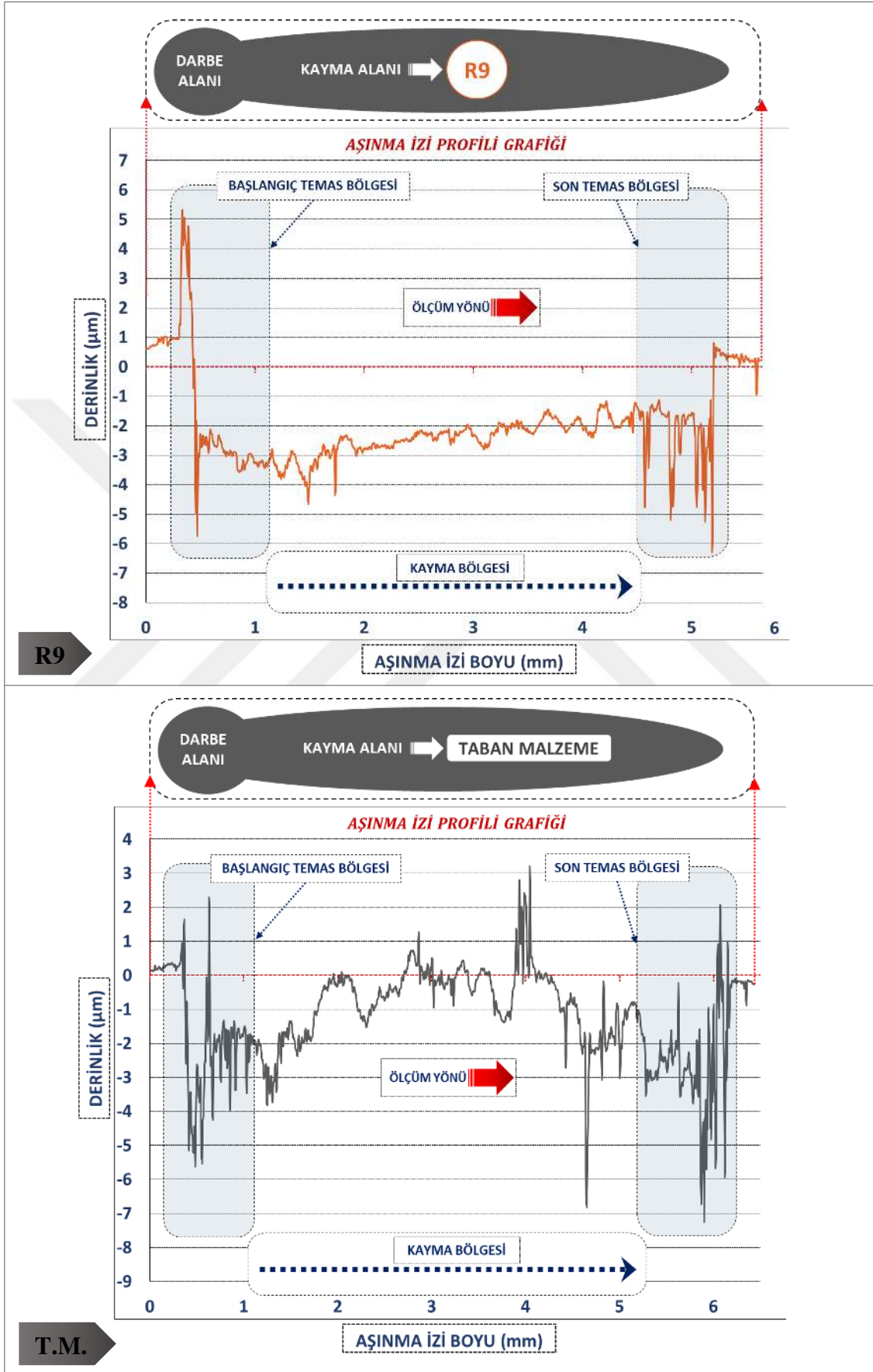
Şekil 94'ün devamı



Şekil 94'ün devamı



Şekil 94'ün devamı



Darbeli-aşınma testlerinden elde edilen aşınma izlerinin optik profilometre görüntülerindeki renk değişimlerinden anlaşılacağı üzere numunelerin aşınma testlerinde en fazla aşınan bölgelerin darbe bölgeleri olduğu görülmektedir. Bu bölgeler aşınma izleri boyunca ağırlıklı olarak kırmızı renkte görülmektedir. Bu durum darbe yükünün kaplama tabakasında hasar mekanizmalarının daha çok oluşmasına sebep olduğu ve be etkiyle birlikte kaplamanın daha erken aşınmaya uğramasına neden olduğu sonucu ortaya koymaktadır.

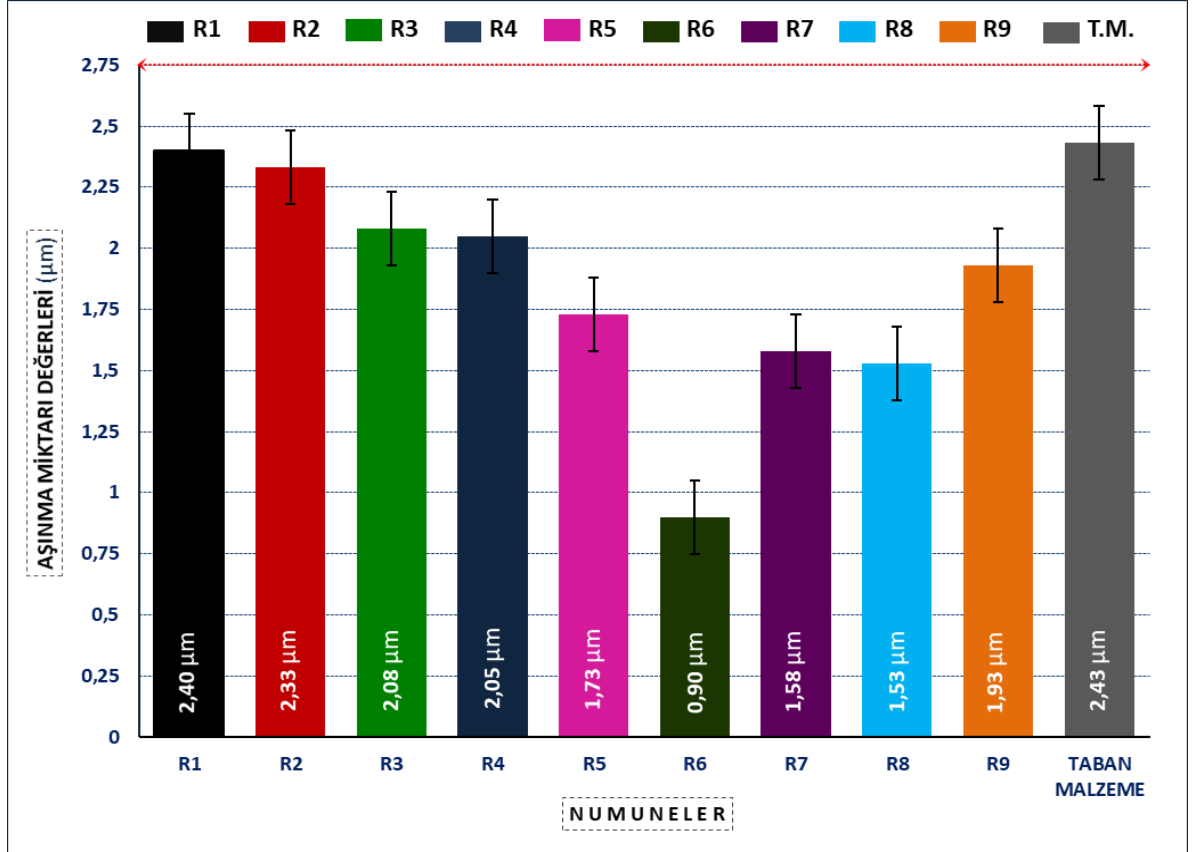
Numuneler üzerinde gerçekleştirilen darbeli-aşınma testlerinden elde edilen aşınma izi profili grafikleri kullanılarak belirlenen aşınma miktarı değerleri Tablo 15’te verilmektedir. Belirlenen darbeli-aşınma miktarı değerleri numunelerin aşınma dayanımları hakkında değerlendirme yapılmak için kullanılmaktadır.

Tablo 15. Numunelerin aşınma izi profillerinden elde edilen aşınma miktarı değerleri

NUMUNE KODU	AŞINMA İZLERİNDEN ELDE EDİLEN AŞINMA MİKTARI DEĞERLERİ		
	AŞINMA İZİ DARBE BÖLGESİ (µm)	AŞINMA İZİ KAYMA BÖLGESİ (µm)	ORTALAMA AŞINMA MİKTARI DEĞERLERİ (µm)
R1	3,35	1,45	2,40
R2	2,75	1,90	2,33
R3	2,15	2,05	2,08
R4	2,95	1,15	2,05
R5	2,15	1,30	1,73
R6	0,95	0,85	0,90
R7	1,80	1,35	1,58
R8	1,95	1,10	1,53
R9	2,60	1,25	1,93
TABAN MALZEME	2,75	2,10	2,43

Değişken parametrelerin uygulandığı 9 farklı numunenin darbeli-kayma aşınma dayanımı testlerinde bütün numunelerin aşınma dayanımının taban malzemedan daha üstün olduğu görülmüştür. Grafik olarak ve görsel olarak verilen aşınma izi profilleri üzerinden, darbeli-aşınma testlerinde en fazla aşınmaya uğrayan numunelerin işlemsiz taban malzeme ve R1 numunelerinin olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 86’daki aşınma izi profili grafiğinden ve Tablo 15’ten de görüldüğü üzere darbeli-kayma aşınma testi sonucunda R6

numunesinin aşınma dayanımı en yüksektir. Numunelerin aşınma miktarı değerleri dikkate alınarak aşınma dayanımları değerlendirildiğinde R6 numunesinin aşınma dayanımının taban malzemeye göre % 63 geliştirilmiş olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Aşınma profili izleri kullanılarak elde edilen aşınma miktarı değerleri grafik olarak Şekil 95’te verilmiştir. Verilen aşınma miktarı değerlerinin değişimi tüm numuneler için grafikte görülmektedir.



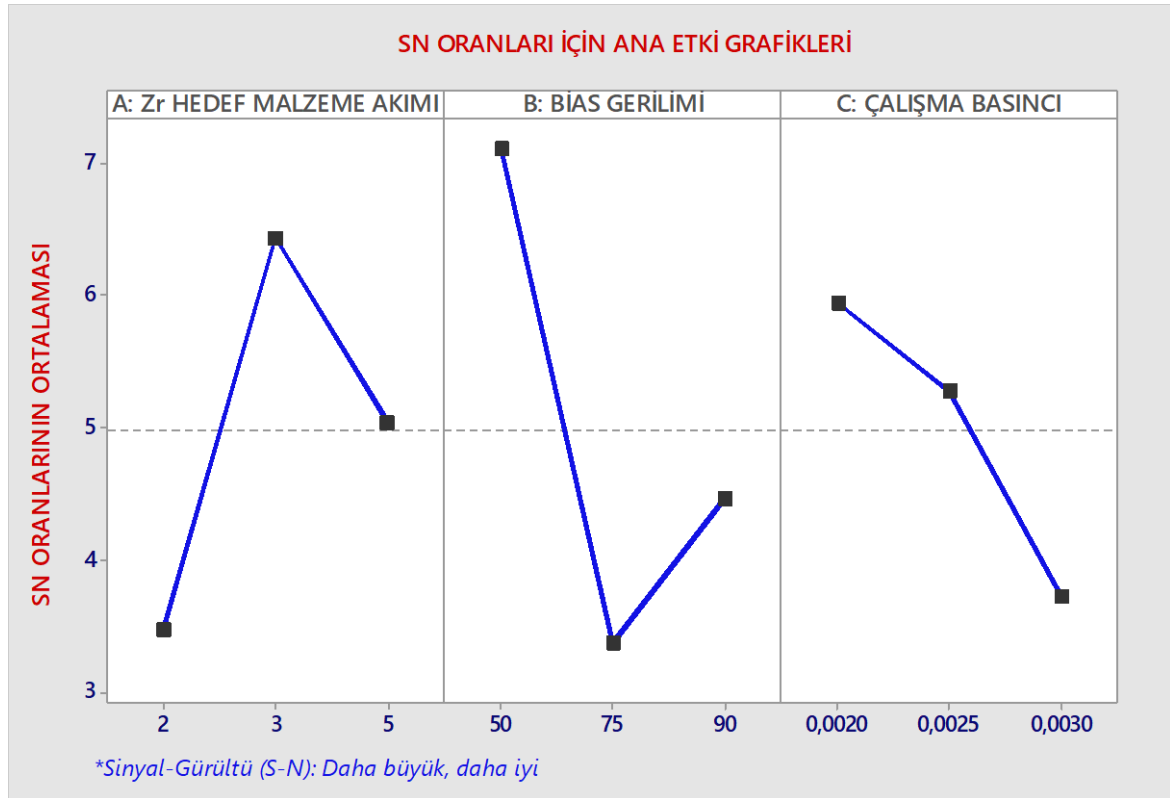
Şekil 95. Numunelerin aşınma izlerinden elde edilen aşınma miktarı değerleri grafiği

Verilen grafikten de görüleceği üzere, R6 numaralı numunenin darbeli-kayma aşınma miktarı değeri diğer numunelere göre oldukça düşüktür. Bu sonuç diğer numunelerle kıyaslandığında R6 numunesinin darbeli-kayma aşınma dayanımının daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. Aşınma izlerinin optik profilometre görüntüleri ve aşınma izi profilleri grafikleri üzerinden bir değerlendirme yapıldığında, en kararlı aşınma profilinin R6 numunesinde gerçekleştiği görülmektedir. R6 numunesinin aşınma testi sonuçlarından öne çıkan bir diğer özelliği ise, aşınma izinin darbe bölgesinde aşırı derecede bir hasar mekanizması gelişmemiş olması ve böylece darbe bölgesinde diğer numunelere oranla daha düşük bir aşınmanın gerçekleşmiş olmasıdır. Darbe bölgesinde oluşan hasar mekanizmaları

oluşan aşınma miktarını kayma bölgesine taşıyarak ilerlemektedir ve aynı zamanda aşınma izinin darbe bölgesinde kaplamada yorulma hasarı sonucu meydana gelen aşınma partikülleri, kayma bölgesinde aşınmayı artırıcı etkiye sahip olan üç elemanlı abrazif aşınma mekanizmasındaki aşındırıcı partiküller olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum sonucunda darbe bölgesinde meydana gelen hasar kayma bölgesinde abrazif aşınmayı tetikleyerek aşınma miktarının katlanarak artmasına neden olmaktadır. Kaplama kalınlığı daha düşük olan R6 numunesinde içyapıdaki yüksek gerilmeler sonucunda yorulma çatlaklarının neden olacağı aşırı bir aşınma hasarı oluşmamıştır. Bu durum, aşınma izi boyunca kayma bölgesinde de aşırı bir aşınmanın meydana gelmemesi ile sonuçlanmıştır. Böylece, belirtilen durumlar R6 numunesinin aşınma değerinin daha düşük olmasına katkı sağlamıştır.

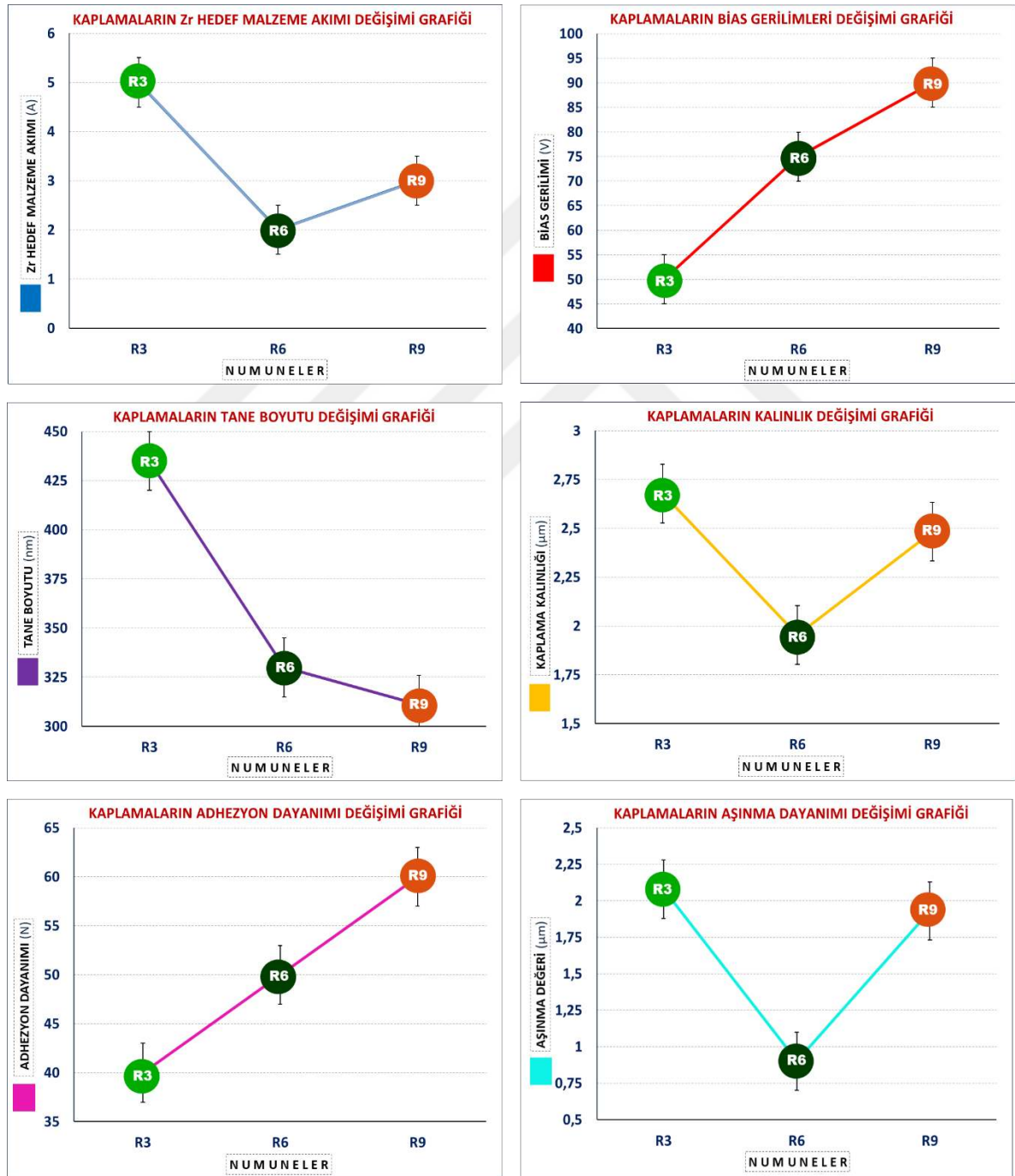
8.6.2. Değişken Kaplama Parametrelerinin Aşınma Dayanımına Etkisi

Aşınma miktarı değerlerinin S/N oranlarının belirlenmesi “daha yüksek daha iyi” kriterine göre Minitap programı kullanılarak yapılmıştır. Yapılan istatistiksel incelemeler sonucunda değişken parametrelere göre elde edilen S/N grafikleri Şekil 96’da verilmiştir.



Şekil 96. Değişken kaplama parametrelerinin aşınma dayanımına etkisi

Yapılan analiz sonucunda elde edilen grafiklerden edinilen bilgiye göre, kaplamaların aşınma miktarı değerlerine etki eden en önemli değişken parametrenin bias gerilimi olduğu, en az etki eden parametrenin ise çalışma basıncı olduğu belirlenmektedir. R3, R6 ve R9 numaralı numunelerin birbirleri ile kıyaslanması adına oluşturulan, çalışma basıncı eşit olmak kaydıyla Zr hedef malzeme akımı, bias gerilimi ve kaplamaların karakteristik özelliklerinin birbirine göre değişimini gösteren grafikler Şekil 97’de verilmektedir.



Şekil 97. R3-R6-R9 numunelerinin kaplama özelliklerinin değişim grafikleri

Verilen grafikler R3, R6 ve R9 numunelerinin kaplama özelliklerinin bir arada aşınma dayanımlarına etkilerinin kıyaslanarak değerlendirilmesi için faydalı olacaktır. Değişken parametrelerin, numunelerin aşınma değerlerine etki dereceleri Tablo 16’da verilmektedir. Aynı şekilde ANOVA analizlerinden elde edilen verilere göre değişken parametrelerin etki oranları da Tablo 17’de verilmektedir.

Tablo 16. Aşınma dayanımına etki eden değişken kaplama parametrelerinin her bir seviye için S/N oranları ve delta istatistiği

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	AŞINMA DAYANIMI			DELTA (MAX-MİN)	ETKİ DERECESİ
	1'İNCİ SEVİYE	2'NCİ SEVİYE	3'ÜNCÜ SEVİYE		
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	3,461	6,431	5,032	2,970	2
BİAS GERİLİMİ	7,104	3,360	4,459	3,744	1
ÇALIŞMA BASINCI	5,937	5,267	3,719	2,218	3

Tablo 17. Değişken kaplama parametrelerinin aşınma dayanımlarına ANOVA analiz sonuçları ile belirlenen etki oranları

DEĞİŞKEN PARAMETRELER	SERBESTLİK DERECESİ	KARELER TOPLAMI	ORTALAMA KARELER	F DEĞERİ	P DEĞERİ	KATKI ORANI (%)
Zr HEDEF MALZEME AKIMI	2	13,247	6,624	1,23	0,448	% 24,5
BİAS GERİLİMİ	2	22,220	11,110	2,07	0,326	% 41
ÇALIŞMA BASINCI	2	7,767	3,884	0,72	0,580	%14,5
OLAĞAN ÖLÇÜM HATASI PAYI	2	10,741	5,371	-	-	-
TOPLAM DEĞER	8	53,976	-	-	-	-

Aşınma miktarı değerleri ile yapılan analizlerden elde edilen bulgular sayesinde numunelerin aşınma dayanımları hakkında değerlendirme yapılmaktadır. Yapılan ANOVA

analizleri sonuçlarına göre, numunelerin aşınma dayanımlarına en çok etki eden değişken parametrenin bias gerilimi olduğu, sonrasında Zr hedef malzeme akımı ve en az etkili olan parametrenin de çalışma basıncı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bias gerilimi, aşınma dayanımına % 41 katkı oranıyla en önemli etkiye sahiptir. Zr hedef malzeme akımı % 24,5 ve çalışma basıncı % 14,5 katkı oranına sahip olmaktadır. ANOVA analizi incelemesi sonucunda en etkin parametre olarak belirlenen bias gerilimi açısından değerlendirildiğinde, bias geriliminin artmasıyla genel olarak numunelerin darbeli-kayma aşınma dayanımlarında da belirli bir değere kadar kademeli bir artış olduğu, belirli bir değerden sonra ise tekrar kademeli olarak azalma olduğu belirlenmiştir. Ayrıca darbeli-kayma aşınma dayanımları açısından değişken parametrelerin tümü kaplamaların aşınma dayanımlarına birlikte etkisi olmaktadır ve bu üç değişken parametre çoğu zaman birlikte değerlendirilerek numunelerin aşınma dayanımına etkileri hakkında tespitler yapılması uygun olacaktır. ANOVA analizlerinden elde edilen katkı oranları dikkate alındığında Zr hedef malzeme akımının da kaplama kalınlıklarına önemli bir derecede etkisi olduğu anlaşılmaktadır.

Numunelerin gerçekleştirilen aşınma testlerinde, çalışma basıncı 2×10^{-3} Torr değerinde sabit olan ve bias gerilimleri sırasıyla 50V, 75V ve 90V değerlerinde olan R1, R4 ve R7 numune grubu değerlendirildiğinde, numunelerin darbeli-kayma aşınma dayanımları kendi aralarında büyükten küçüğe doğru R7, R4 ve R1 şeklinde sıralanmaktadır. Bu durumda yapılacak değerlendirmeye göre, çalışma basıncının sabit olduğu durumda bias geriliminin artması numunelerin darbeli-kayma aşınma dayanımlarını artırmaktadır. Verilen bu numune grubunda tane boyutu ve sertlik dikkate alındığında, R7 numunesinin tane boyutunun diğer numunelerden daha küçük olduğu ve sertlik değerlerinin diğer numunelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı zamanda R1 numunesinin sertlik değeri numune grubunda en küçük değere sahiptir. Bu numune grubunda tane boyutunun nispeten daha ince bir yapıda olması ve kaplama tabakasının daha sert olması, bias gerilimi etkisi ile birlikte adezyon dayanımında ve darbeli-kayma aşınma dayanımında bir artış meydana getirdiği düşünülmektedir [118, 119, 120, 121, 122, 123, 124].

Numunelerin gerçekleştirilen deneysel aşınma dayanımı çalışmalarında, çalışma basıncı $2,5 \times 10^{-3}$ Torr değerinde sabit olan ve bias gerilimleri sırasıyla 50V, 75V ve 90V değerlerinde olan R2, R5 ve R8 numune grubu değerlendirildiğinde, numunelerin darbeli-kayma aşınma dayanımları kendi aralarında büyükten küçüğe doğru R8, R5 ve R2 şeklinde sıralanmaktadır. Bu numune grubunda da sabit çalışma basıncında, bias geriliminde meydana gelen artışın aşınma dayanımında da artış sağladığı görülmektedir. Artan bias

gerilimi sayesinde kaplama yapısının daha düzenli bir yapıda büyüdüğü ve nispeten daha yoğun bir kaplama içyapısı sağlandığı bilindiğinden, kaplama tabakalarının yüksek bias geriliminde darbeli-kayma aşınma etkisine karşı daha dayanımlı bir özellik kazandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda numunelerden R8 numunesinin sertlik değeri numune grubunda diğerlerinden daha yüksektir. Bu durum dikkate alındığında, diğer numune grubunda olduğu gibi sertlik değerinin kaplama tabakasında bias gerilimi yanı sıra darbeli-kayma aşınma dayanımını artırıcı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca yine R8 numunesinin tane boyutunun diğerlerinden daha küçük yapıda olduğu bilinmektedir. Kaplama tabakasının tane yapısının küçük olması, kaplamanın darbeli-kayma aşınma dayanımına katkı sağladığı görülmektedir [125, 126, 127, 128].

Numunelerin gerçekleştirilen deneysel aşınma dayanımı çalışmalarında, çalışma basınçları 3×10^{-3} Torr değerinde sabit olan ve bias gerilimleri sırasıyla 50V, 75V ve 90V değerlerinde olan R3, R6 ve R9 numune grubu değerlendirildiğinde, numunelerin darbeli-kayma aşınma dayanımlarının kendi aralarında büyükten küçüğe doğru R6, R9 ve R3 şeklinde sıralandığı görülmektedir. R3 ve R9 numuneleri birlikte dikkate alındığında, bias gerilimindeki artış kaplamanın darbeli-kayma aşınma dayanımına katkı sağladığı sonucuna ulaşılmaktadır. R9 numunesinin tane boyutunun R3 numunesinin tane boyutundan daha küçük olması tane boyutunun yine darbeli-aşınma dayanımı üzerindeki etkisine işaret etmektedir. Hall-patch bağıntısından da bilindiğine göre küçük tane boyutlu yapılarda sertlik ve mukavemet daha fazladır. Bu olgu göz önünde bulundurulduğunda R9 numunesinin darbeli-kayma aşınma dayanımı R3 numunesinden daha fazla olmaktadır. Ancak R6 ve R9 numunelerinin tane boyutları arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Bu nedenle tane boyutu değerlerinin R6 ve R9 numunelerinin darbeli-kayma aşınma dayanımlarının kıyaslanmasında etkisinin büyük olmayacağı öngörüsünde bulunulabilir. Aynı zamanda R6 ve R9 numunelerinin sertlik değerleri R3 numunesinden büyük olmakla birlikte birbirine yakın değerlerdedir. R6 ve R9 numunelerinin darbeli-kayma aşınma dayanımlarının değerlendirmesinde sertlik değerinin dikkate alınarak kıyaslama yapılması da çok net sonuçlara ulaşılmasını sağlamayacaktır.

ANOVA analizlerine göre değişken kaplama parametrelerinden kaplama yapısına ikinci derecede etki eden Zr hedef malzeme akımının numune grubunda R6 numunesinde en az değerde olduğu görülmektedir. Daha önce ilgili bölümlerde tespit edildiği gibi, Zr hedef malzeme akımının düşük olması kaplama tabakasında azot oranını artırmaktadır. EDS verilerinden elde edilen sonuçlara bakıldığında Tablo 7’de de görüldüğü gibi R6

numunesinin kaplama bileşimindeki azot oranı R9 numunesindeki azot oranından daha fazladır. Aynı zamanda R6 numunesindeki Zr atomik yüzde miktarı R9 numunesinin yarısı kadar olduğu bilinmektedir. Kaplama tabakası yapısındaki azot miktarının Zr elementinin kaplamadaki atomik miktarları ile birlikte kaplamaların darbeli-kayma aşınma dayanımlarına etki etmekte olduğu öngörülmektedir. Bu çalışmada, artan azot oranının belli bir seviyeye kadar kaplamanın darbeli-kayma aşınma dayanımını artırdığı düşünülmektedir. Zr elementinin atom boyutunun kaplama bileşimindeki diğer elementlerden daha büyük olmasından dolayı büyük atomlu elementin daha fazla olduğu kaplama tabakası içyapısının darbeli-kayma aşınma etkisine karşı zayıfladığı düşünülmektedir.

Öte yandan, daha önce ilgili bölümlerde aktarıldığı gibi en düşük kaplama kalınlığına numune grubundaki R6 numunesi sahiptir. Nispeten daha büyük kaplama kalınlıkları içyapıdaki kolon tane yapıları arasında daha yüksek iç gerilmeler doğurduğundan dolayı kaplama kalınlığı R6 numunesinden oldukça fazla olan R9 numunesinin darbeli-kayma aşınma dayanımı zayıflamış olduğu fikri oluşmaktadır [129]. Kaplama kalınlığı etkisi ile birlikte kaplama tabakası içyapısının boşluksuz olma özelliği de aşınmayı benzer şekilde etkilemektedir. Değişken kaplama parametrelerinin etkisiyle R6 kaplama tabakasının daha boşluksuz olduğu düşünülmektedir [120, 121, 122, 123]. Düzensiz içyapı, özellikle darbe etkisiyle içyapıdaki boşluklu yapılardan kaynaklanan iç gerilmeleri artırarak kaplama tabakasında daha kolay çatlak oluşumuna ve dolayısıyla aşınma hasarının artmasına neden olmaktadır. Bu noktada daha boşluksuz yapıda olduğu düşünülen R6 numunesinde bu nedenle nispeten daha az bir aşınma olduğu sonucuna varılmaktadır. R6 ve R9 numunelerinin aşınma izi profillerine bakıldığında, R9 numunesinin aşınma izinde kaplama tabakasının darbe bölgesinde tamamen soyulduğu görülmektedir. Adezyon dayanımı nispeten düşük olan R9 numunesinin darbe bölgesinde yorulma sonucunda oluşan mikro-çatlakların neden olduğu partikül kopmaları oluşmuştur. Oluşan partiküller aşındırıcı bilye ve kaplama yüzeyi arasına sıkışarak kayma sırasında kayma bölgesinde abrazif aşınmaya neden olmuştur. Kaplamadan yorulma çatlakları sonucunda kopan partiküller kaplama yüzeyinde kazınma, oyulma ve yontulma hasarlarına neden olmaktadır. Bu durum, test süresince R9 numunesinde aşınma izinin tamamında meydana gelen aşınmanın daha şiddetli olmasına ve aşınma değerinin yükselmesine neden olmuştur [124, 126, 127, 128].

Değişken parametrelerin ve deneysel sonuçlardan elde edilen diğer bulguların, numunelerin darbeli-kayma aşınma dayanımlarına etkisinin değerlendirilmesi için oluşturulan genel bilgi tablosu Tablo 18’de verilmektedir.

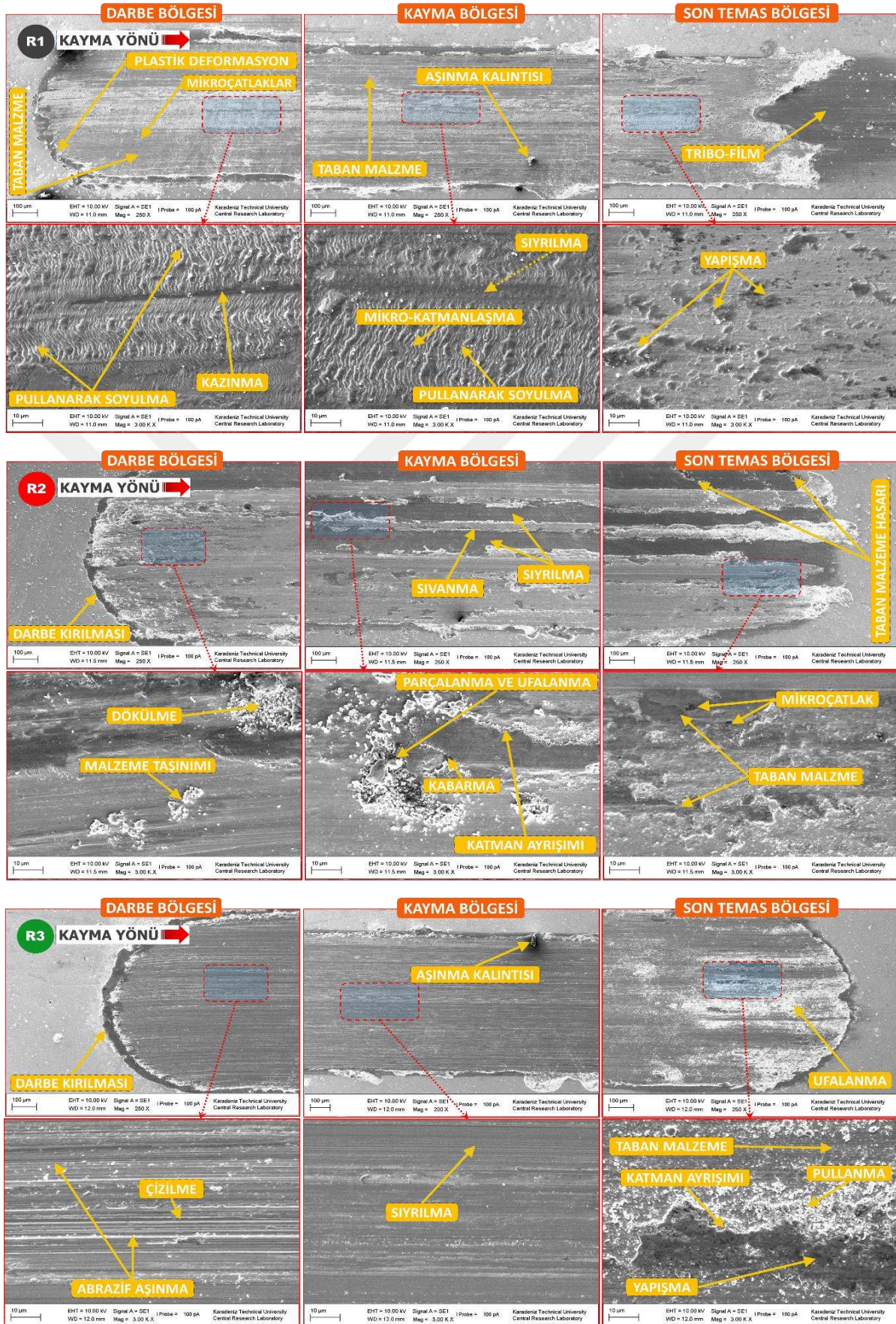
Tablo 18. Deneysel çalışmaların genel sonuçları ile numunelerin kaplama parametreleri

AÇIKLAMA	NUMUNE KODU	BİAS GERİLİMİ	Zr HEDEF MALZEME AKIMI	ÇALIŞMA BASINCI
EN BÜYÜK TANE BOYUTU: 435 ± 50 nm	R3	50 V	5 A	3x10 ⁻³ Torr
EN KÜÇÜK TANE BOYUTU: 282 ± 50 nm	R7	90 V	5 A	2x10 ⁻³ Torr
EN BÜYÜK KAPLAMA KALINLIĞI: 2,677 µm	R3	50 V	5 A	3x10 ⁻³ Torr
EN KÜÇÜK KAPLAMA KALINLIĞI: 1,954 µm	R6	75 V	2 A	3x10 ⁻³ Torr
EN BÜYÜK MİKROSERTLİK: 2395 VSD	R7	90 V	5 A	2x10 ⁻³ Torr
EN KÜÇÜK MİKROSERTLİK: 1880 VSD	R1	50 V	2 A	2x10 ⁻³ Torr
EN BÜYÜK NANOSERTLİK: 4670 VSD	R7	90 V	5 A	2x10 ⁻³ Torr
EN KÜÇÜK NANOSERTLİK: 1850 VSD	R1	50 V	2 A	2x10 ⁻³ Torr
EN İYİ ADEZYON DAYANIMI: 80 N	R7	90 V	5 A	2x10⁻³ Torr
EN KÖTÜ ADEZYON DAYANIMI: 40 N	R3	50 V	5 A	3x10 ⁻³ Torr
EN DÜŞÜK AŞINMA MİKTARI DEĞERİ: 0,90 µm	R6	75 V	2 A	3x10⁻³ Torr
EN FAZLA AŞINMA ORANI: 2,40 µm	R1	50 V	2 A	2x10 ⁻³ Torr

Tablo incelendiğinde taban malzemedен sonra kaplanmış numuneler arasında R1 numunesinde en fazla aşınmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuca değişken kaplama parametrelerinin birlikte etki ettiği bilinmekle birlikte, tablodan R6 numunesinin en yüksek çalışma basıncına ve en düşük Zr hedef malzeme akımına sahip olduğu görülmektedir. R6 numunesinde meydana gelen nispeten düşük darbeli-kayma aşınma miktarı, en yüksek çalışma basıncı ve en düşük Zr hedef malzeme akımının etkisi ile birlikte bias gerilim değerinin belirli bir değerde olması sonucunda meydana geldiği görülmektedir. Bias gerilimi, Zr hedef malzeme akımı ve çalışma basıncının etkisiyle elde edilen R6 kaplama tabakasının karakteristik özellikleri neticesinde darbeli-kayma aşınma etkisine karşı 9 numune arasında en yüksek aşınma dayanımı R6 numunesinden elde edilmiştir.

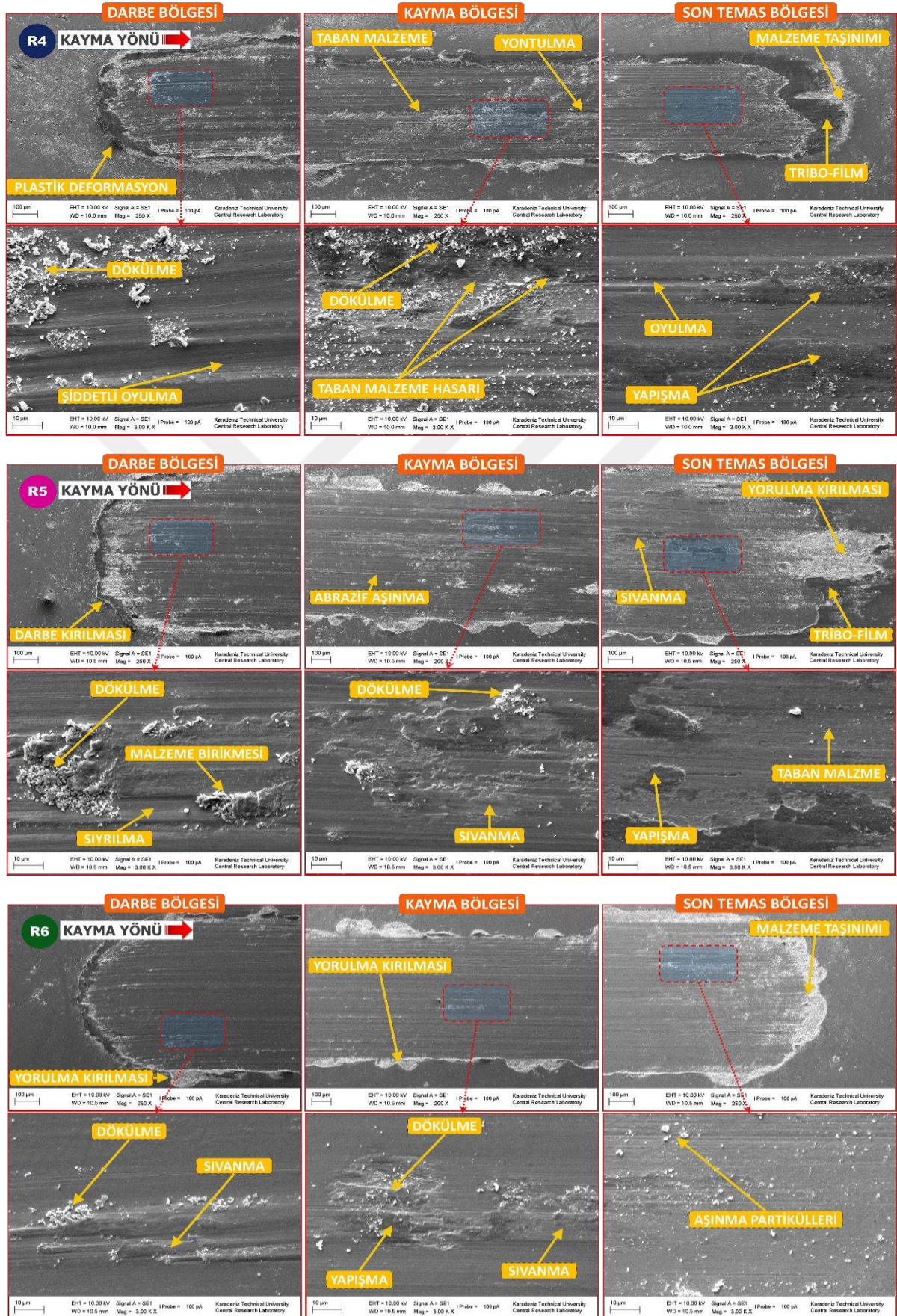
8.6.3. Aşınma İzlerinin SEM Analizleri

Numunelerin darbeli-kayma aşınma testlerinden elde edilen aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve görüntüler üzerindeki aşınma hasar mekanizmalarının gösterimleri kaplamalı numuneler ve taban malzeme için ayrı ayrı detayları ile birlikte Şekil 98’de verilmektedir.

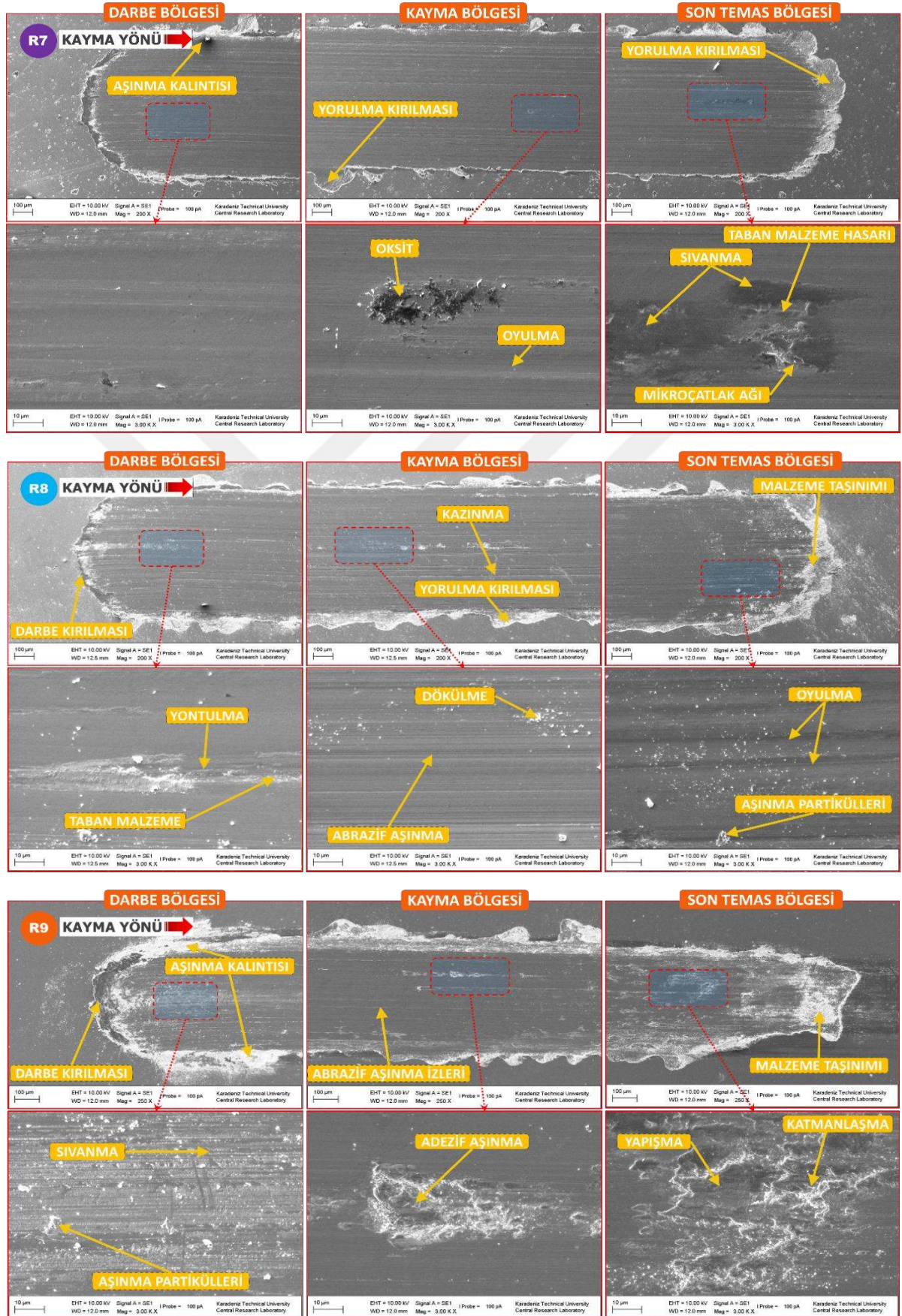


Şekil 98. Numunelerin darbeli-kayma aşınma izi SEM görüntüleri

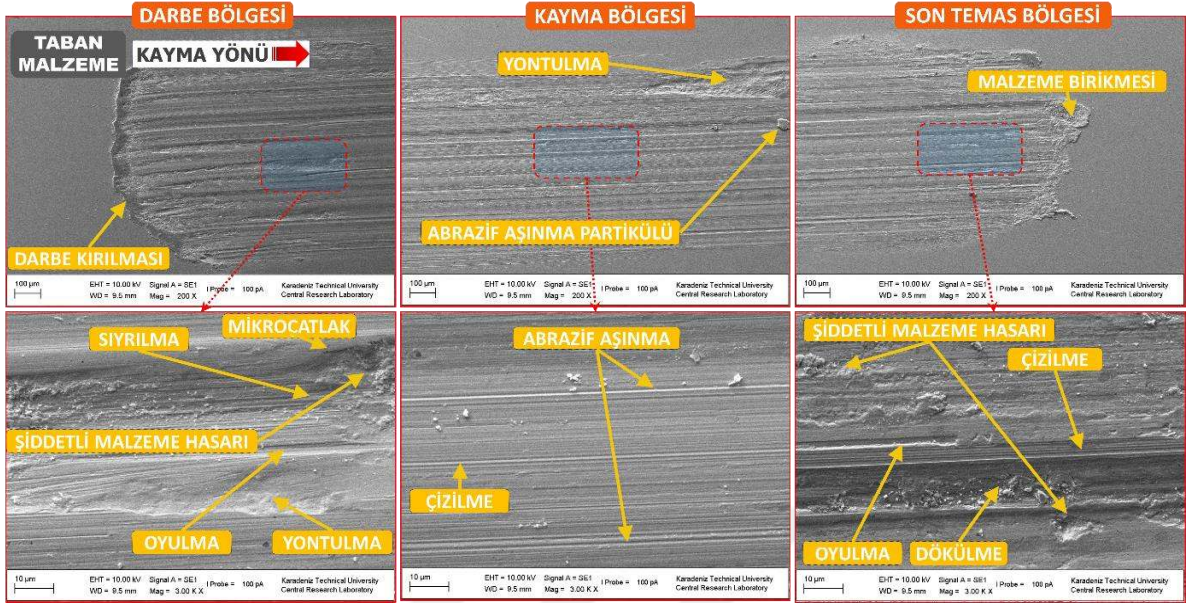
Şekil 98'in devamı



Şekil 98'in devamı



Şekil 98'in devamı



Taban malzemenin ve TiAlZrN kaplanmış numunelerin, darbeli-kayma aşınma testlerinden elde edilen aşınma izlerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, işlem görmüş numunelerin taban malzemeye göre daha az hasara uğradığı görülmüştür. SEM görüntülerinden de görüldüğü üzere, numunelerde meydana gelen aşınma hasarlarının darbe etkisi ile aşınma yolunda oluşan yorulma mikro çatlakları ile başladığı ve deney sürecinde ilerleyerek rastlanan diğer hasarlara neden olduğu anlaşılmaktadır [81, 130, 131]. Mikro çatlakların ilerlemesiyle numunelerden kopan aşınma parçacıklarının üç elemanlı aşınmaya neden olduğu ve yüzeyden kopan parçaların karşı yüzey ve numune arasına sıkışmasıyla birlikte abrazif aşınmaya neden olduğu görülmektedir [81, 132, 133, 134]. Bu aşınma mekanizmasıyla birlikte özellikle plastik deformasyona olan dayanımı düşük olan kaplamalarda malzeme taşınımı tespit edilmiştir. [135, 136]. Abrazif aşınma nedeniyle meydana gelen çizilmelerin haricinde, adezyon dayanımı düşük olan kaplamalarda dökülme, pullanma, kazınma ve oyulma gibi hasar mekanizmaları yaygın bir şekilde meydana gelmiştir. [148]. Numunelerde aşınma hasar mekanizmalarının aşınma izinin merkezine doğru yoğunlaştığı ve darbe kraterinde aşınma izinin merkezine doğru mikro-çatlakların daha fazla olduğu görülmektedir [130, 131, 137].

Taban malzemenin aşınma izinin SEM görüntüsüne bakıldığında, özellikle darbe bölgesinde şiddetli plastik deformasyon hasarı ve bunun neden olduğu mikro çatlaklar görülmektedir. Son temas bölgesinde ise darbe bölgesinden kopan parçacıklar, karşı yüzey

ve numune arasında taşınarak, bu bölgede derin oyuklar, yontulmalar ve çizikler meydana getirmiştir [80, 135, 136]. Kaplamalar arasında, en düşük sertliğe sahip R1 kaplamasının aşınma izine bakıldığında, darbe bölgesi ve devamındaki kayma bölgesinde pullanma ve mikro katmanlaşma mekanizmalarına rastlanmıştır. Literatür bilgisinden edinilen bilgilere göre, kaplama tabakasında meydana gelen mikro-katmanlaşmanın ve pullanarak soyulmanın kaplamanın sertliğinin düşük olmasından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmaktadır. Aşınma izinde son temas bölgesinde ise kayma bölgesinden taşınan kaplama tabakasının neden olduğu yapışma ve aşınma izinin en son kısmında da bir tribo-film oluştuğu görülmektedir. R1 kaplamasının aşınma izinden elde edilen SEM görüntüsü, Şekil 95'te verilen aşınma değerlerini doğrular niteliktedir. R2 kaplamasında ise kayma ve son temas bölgesinde, karşı yüzey ve kaplama arasında sıkışan aşınma parçacıkları aşınma izinde derin sıyrılmalara neden olmuştur. Ayrıca son temas bölgesinde ise kaplamanın kısmi olarak yüzeyden ayrıldığı ve karşı yüzeyin taban malzemede mikro çatlaklara neden olduğu görülmektedir. R3 kaplamasının darbe ve kayma bölgelerinde, yukarıda bahsedilen 3 elemanlı aşınmanın neden olduğu abrazif çizikler net bir şekilde görülmektedir. Son temas bölgesinde ise darbe ve kayma bölgelerinden taşınan malzeme ile bilye arasında mikro kaynak bağlantısı meydana gelmiştir. Söz konusu mikro kaynak bağı deneyin ilerleyen bölümlerinde koparak adezif aşınmaya sebep olmuştur. R4 numunesinin aşınma izinin SEM görüntülerine bakıldığında, darbe bölgesinde, yükleme etkisiyle yüzeyde plastik deformasyonla derin oyuklar meydana gelmiştir. Kayma ve son temas bölgesinde ise kaplamanın yüzeyden kalkmasıyla birlikte taban malzemede hasarlar meydana gelmiştir. Söz konusu taban malzeme hasarı Şekil 94'teki yatay aşınma profili grafiğinde de görülmektedir. R5 kaplamasında, darbe bölgesinde, kayma ve son temas bölgesinden taşınan malzemelerin biriktiği görülmektedir. Deney süresince bu birikimin pullanma şeklinde yüzeyden ayrılarak bilye arasında sıkışmasıyla derin sıyrılma izlerine rastlanmıştır. R6 numunesinin aşınma izinin SEM görüntüsünde, büyük ölçekli bir aşınma hasarının olmadığı görülmektedir. Bu durum kaplama kalınlığının darbeli-kayma aşınma dayanımına önemli bir etkisi olduğunun göstergesidir. R6 numunesinde dana düşük kaplama kalınlığı sayesinde kaplama tabakası içyapısında darbeli yüklemeyle oluşan iç gerilmelerin etkisi daha düşük olmuştur. Numunede kaplama kalınlığının daha düşük değerde olması sonucunda darbe etkisi ile kaplamada oluşan yorulma mikro-çatlaklarının daha az oluşarak aşınma partikülü üretememesi ve böylece kayma sırasında abrazif aşınma mekanizmasının gerçekleşmemesi nedeniyle aşınmanın daha düşük bir değerde kaldığı öngörülmektedir. En iyi aşınma

dayanımına sahip olan R6 kaplamasında, aşınma izinin diğerlerinden daha yüzeysel kaldığı ve son temas bölgesinde aşınma parçacıklarının yüzeydeki varlığı görülmektedir. Ayrıca darbe ve beraberindeki kayma etkisiyle izin kenar bölgelerinde yorulma kırılmalarına da rastlanmıştır. Kaplamalar arasında en yüksek yapışma dayanımına sahip R7 kaplamasında ise aşınma izinin üniform bir yapıda olduğu görülmektedir. Darbe bölgesinde belirgin bir hasar tespit edilmemekle birlikte, son temas bölgesinde mikro çatlak ağları görülmektedir. R8 kaplamasında aşınma izinin içerisinde her 3 bölgede de aşınma parçacıkları tespit edilmiştir. En yüksek aşınma hasarı darbe bölgesinde meydana gelmekte olup, bu bölgede kopan aşınma parçacıkları kayma ve son temas bölgesinde abrazif aşınma ve yüzeysel oyuklar meydana getirmiştir. R9 kaplamasında ise, özellikle kayma ve son temas bölgelerinde, adezif aşınma örneklerine rastlanmıştır. Karşı yüzey ile kaplama arasında oluşan mikro kaynak bağlantısından kopan parçacıklar darbe bölgesinde sıvanmalara ve abrazif çizilmelere neden olmuştur [80, 81, 134, 135, 136, 138].

9. SONUÇLAR

Bu çalışmanın belirlenen amacı doğrultusunda yüzeyleri değişken parametreler olarak belirlenen bias gerilimi (50V - 75V - 90V), Zr hedef malzeme akımı (2A - 3A - 5A) ve çalışma basıncının (2×10^{-3} - $2,5 \times 10^{-3}$ - 3×10^{-3} Torr) farklı varyasyonları ile TiAlZrN kaplanan numunelerin yapısal özelliklerinin aşınma davranışlarına etkileri belirlenmiştir. Atmosfer ortamında yükleme hızı 3 mm/s ve kayma hareketi hızı 5 mm/s olmak üzere 10 N'luk darbe yükü ile 500 çevrim (40 dak.) uygulanan numunelerin darbeli-kayma aşınma davranışlarının incelenmesinden elde edilen bulguların sonuçları aşağıda verilmiştir.

1. Gerçekleştirilen darbeli-kayma aşınma testleri, darbeli-kaymanın makine parçalarındaki aşınma hasarının oluşumu ve gelişimi üzerindeki deformasyon etkisine önemli bir bakış açısı sağlamaktadır.
2. Aşınma testlerinden elde edilen bulgulara göre, belirlenen değişken kaplama parametreleri ile uygulanan TiAlZrN kaplamalar H13 taban malzemenin darbeli-kayma aşınma dayanımını % 63 oranında artırır.
3. En yüksek darbeli-kayma aşınma dayanımı; 2A Zr hedef malzeme akımı, 75V bias gerilimi ve 3×10^{-3} Torr çalışma basıncı parametreleri ile kaplanan nispeten daha düşük kaplama kalınlığına (1,954 μm) sahip R6 numunesinde elde edilir.
4. TiAlZrN kaplama tabakasının kalınlığına, sertlik değerlerine, adezyon ve aşınma dayanımına en fazla bias geriliminin etkisi vardır.
5. TiAlZrN kaplama tabakasının kalınlığına, sertlik değerlerine ve aşınma dayanımına en az çalışma basıncının, adezyon dayanımına en az Zr hedef malzeme akımının etkisi vardır.
6. En yüksek mikrosertlik (2395 VSD), nanosertlik (4670 VSD) ve adezyon dayanımı (80N); 5A Zr hedef malzeme akımı, 90V bias gerilimi ve 2×10^{-3} Torr çalışma basıncı parametreleri ile TiAlZrN kaplanan R7 numunesinde görülür.
7. En düşük TiAlZrN kaplama kalınlığı (1,954 μm) en düşük Zr hedef malzeme akımına (2A) sahip ve 75V bias gerilim değerindeki R6 numunesinde elde edilir.
8. Belirlenen değişken kaplama parametrelerinin uygulandığı TiAlZrN kaplama işleminde nispeten en büyük tane boyutu (435 ± 50 nm) en düşük bias gerilimine (50V) ve en yüksek çalışma basıncına (3×10^{-3} Torr) sahip R3 numunesinde elde edilir. Nispeten en küçük tane boyutu (282 ± 50 nm) en yüksek bias gerilimine (90V) ve en düşük çalışma basıncına (2×10^{-3} Torr) sahip R7 numunesinde elde edilir.

10. ÖNERİLER

Endüstriyel uygulamalarda darbeli yüklere maruz kalan makine parçalarına uygulanacak sert seramik kaplama tabakalarının darbeli-kayma aşınma davranışlarının daha detaylı araştırılması amacıyla aşağıda verilen durumların incelenmesi uygun olacaktır.

1. Farklı kaplama tabakaları ile kaplanmış numunelerin darbeli-aşınma davranışları incelenebilir.
2. Kaplamalı numunelerin darbeli-kayma aşınma testleri, farklı çalışma ortamlarında uygulanabilir.
3. Kaplamalı numunelerin yüksek sıcaklıkta darbeli-kayma aşınma testleri gerçekleştirilebilir.
4. Belirlenen değişken kaplama parametreleri sabit kalacak şekilde, kaplamalı numunelerin darbeli-kayma aşınma testinde uygulanan yük değeri, döngü sayısı, darbe ve kayma hızı değişken parametreler olarak kabul edilerek değişen bu deney koşullarının kaplamaların aşınma davranışı üzerindeki etkileri ayrıca incelenebilir.

11. KAYNAKLAR

1. Affatato, S. and Grillini, L., Bio Tribocorrosion in Biomaterials and Medical Implants, Topography in Bio-tribocorrosion, Birinci Baskı, Woodhead Publishing Limited, Sawston/Cambridge, 2013.
2. Holmberg, K. and Erdemir, A., Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions, Friction, 5, 3 (2017) 263-284.
3. Bhushan, B., Introduction to Tribology, İkinci Baskı, John Wiley & Sons Ltd., USA, 2013.
4. Lenard, J. G., Primer on Flat Rolling, İkinci Baskı, Tribology, Ontario/Canada, 2013.
5. Erdem, S., Yüksek Karbon İçeriğine Sahip, Yüksek Kromlu, Manganlı ve Alaşımsız Düşük Karbonlu Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.
6. Mang, T. and Dresel, W., Lubricants and Lubrication, İkinci Baskı, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Germany, 2007.
7. Aytaç, A., HK33E/G3 Piyade Tüfeği Silah Kurma Mekanizmalarında Aşınan Parçaların Çalışma Performanslarının Artırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
8. Gök, M. S., Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine TIG Kaynak Metoduyla Kaplanan Ostenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
9. Sert, Y., Nitrülenmiş H13 Çeliği Yüzeyine Kaplanan TiAlZrN Tabakasının Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016.
10. Stachowiak, G. and Batchelor, A. W., Engineering Tribology, Üçüncü Baskı, Butterworth Heinemann, Australia, 2005.
11. Yılmaz, M. A., TiAlN, AlTiN ve AlCrN Kaplamaların Sınır Yağlama Şartlarında Tribolojik Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi, Barbaros Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü, İstanbul, 2020.

12. Poyraz, M., RF Magnetron Saçtırma Tekniği İle AISI440C Çeliğe Yapılan Ara Tabakasız ve Ara Tabakalı MoS₂ İnce Film Kaplamaların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2019.
13. Alkan, S., Nitritür Esaslı Seramik İnce Film Kaplamaların Deniz Suyu Ortamındaki Tribokorozyon Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2019.
14. Yılmaz, İ. Ö., Otomotiv Sac Şekillendirme Kalıplarında Kullanılan Malzemelerin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2012.
15. Bülbül, A. E., Kaplamasız, PVD Tekniği İle TiN ve AlTiN Kaplanmış DIN 1.2379 Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013.
16. Gür, A. K., Aşınma Mekanizmaları, Doktora Semineri, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2006.
17. Kato, K. and Adachi, K., Modern Tribology Handbook, Wear Mechanisms, Birinci Baskı, CRC Press, Florida, 2000.
18. Keskin, İ., Yüksek Mekanizmalarında Aşınma ve Elastohidrodinamik Yağlama, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
19. Ludema, K. C., Friction Wear Lubrication A Textbook in Tribology, Birinci Baskı, CRC Press, Florida, 1996.
20. Çakır, M. C., Modern Metal Cutting: Modern Talaşlı İmalatın Esasları, 267, Birinci Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2006.
21. Kayalı, E. S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y. ve Çimenoglu, H., Hasar Analizi Seminer Notları, Metalurji Mühendisleri Odası, İstanbul, 1997.
22. Ghasemi Owsalou, R., Aşınmaya Maruz Parçaların Aşınma Dayanımlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2012.
23. Sarıkaya, Ö., Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri, 280, Birinci Baskı, Sakarya, 2007.

24. Usta, O., Hızlandırılmış Erozyon Testleriyle Malzemelerin Kaviteasyon Erozyonu Özelliklerinin İncelemesi, Gemi ve Deniz Teknolojileri Dergisi, 216 (2019) 32-49, Milli Savunma Üniversitesi, Deniz Harp Okulu, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 2019.
25. Soydaş, S., Ünlversal Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006.
26. <https://docplayer.biz.tr/17833981-Bolum-i-yuzey-teknikleri.html>, Bölüm 1, Yüzey Teknikleri, Tarih: 12:26, 14 Mart 2021.
27. Savaş, S., Manyetik Alanda Sıçratma Metodu İle Üretilen TiAlN Kaplamaların Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2010.
28. Boynueyri, D., PVD Yöntemi İle İnce Kaplanmış Kesici Takımların Mikro Ölçekli Aşınma Testi İle Aşınma Dayanımının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2019.
29. <https://www.turkchem.net/baglanti-elemanlari-uzerinde-yuzey-isleme.html>, Bağlantı Elemanları Üzerinde Yüzey İşleme, Tarih: 12:50, 14 Mart 2021.
30. Panjan, M., Physical and Chemical Properties of Nanolayered Metal-nitride Coatings Prepared by Sputtering, Doktora Tezi, University of Ljubljana, Slovenya, 2010.
31. Veinthal, R., Sergejev F., Yaldiz C. E. and Mikli V., Impact Wear Performance of Thin Hard Coatings on TiC Cermets, Journal of ASTM International, 8, 7 (2011), Paper ID: JAI103272, Department of Materials Engineering, Tallinn University of Technology, Ehitajate tee 5, Tallinn, Estonia.
32. Astakhov, V. P. and Davim, J. P., Machining: Fundamentals and Recent Advances, Editör: Davim, Birinci Baskı, J. P., Springer-Verlag London Limited, UK, 2008.
33. Lukaszewicz, K., Dobrzanski, L. A., Kokot, G. and Ostachowski, P., Characterization and Properties of PVD Coatings Applied to Extrusion Dies, Vacuum, 86 (2012) 2082-2088.
34. Cunha, L., Andritschky, M., Pischow, K. and Wang, Z., Microstructure of CrN Coatings Produced by PVD Techniques, Thin Solid Films, (1999) 355-356, 465-471.
35. Quinto, D. T., Twenty-five Years of PVD Coatings at The Cutting Edge, Fall Bulletin, 17-22, Oerlikon Balzers Coating USA Inc, USA, 2007.

36. Dobrzanski, L. A., Polok, M., Panjan, P., Bugliosi, S. and Adamiak, M., Improvement of Wear Resistance of Hot Work Steels by PVD Coatings Deposition, Journal of Materials Porcessing Technology, (2004) 155-156.
37. Ürgen, M., Modern Yüzey İşlem Teknolojileri ve Türkiye'deki Gelişmeler, 9. Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, 333-350, İstanbul, 1997.
38. Şentürk, Ö., Biriktirme Oranı ve Döner Alt Tabaka Hızının, Püskürtme Metoduyla Üretilen FeCrNiCd Alaşım İnce Filmlerinin Yapısal ve Manyetik Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2019.
39. Eryılmaz, O. L., Ark Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemiyle Nanokompozit Mo-N-Cu Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
40. Holmberg, K. and Matthews, A., Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering, Elsevier, İkinci Baskı, 560, UK, 2009.
41. Özgüzar, H. F., Biyomedikal Uygulamalara Yönelik Amin Gruplarınca Zengin İnce Filmlerin Kararlılıklarının Geliştirilmesi: Plazma Polimerizasyon Yöntemi İle N-Hekzan Alttaş Film Uygulaması, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.
42. <https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/postgraduate/regs/mpagswarwick/ex5/growth/cvd/>, Department of Physics, CVD Process Flow Chart, Tarih: 17:00, 08 Mart 2021.
43. Baragetti, S., La Vecchia, G. M. and Terranova, A., Variables Affecting The Fatigue Resistance of PVD-coated Components, International Journal of Fatigue, 27 (2005) 1541-1550.
44. Björk, T., Westergård, R., Hogmark, S., Bergström, J and Hedenqvist, P., Physical Vapour Deposition Duplex Coatings for Aluminium Extrusion Dies, Wear, (1999) 225-229, 1123-1130.
45. Björk, T., Westergard, R. and Hogmark, S., Wear of Surface Treated Dies for Aluminium Extrusion- A Case Study, Wear, 249 (2001) 316-323.
46. Savaş, S., PVD Metodu ile TiN Kaplanmış S 6-5-2 Yüksek Hız Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2004.

47. Sönmezoğlu, S., Koç M. ve Akın S., İnce Film Üretim Teknikleri, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 28, 5 (2012) 389-401.
48. Danışman, M., Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemiyle Üretilen Ni-Cr Alaşımlarının Gerinim Ölçerlerde Kullanımı ve Uygulaması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
49. Küley, U., Nanokompozit Mo-N-Cu Kaplamaların Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
50. Esen, K., Sol-Jel Yöntemi İle ZrO_2 İnce Film Üretimi ve Yapısal Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2017.
51. Köç, P., RF-Magnetron Sıçratma Yöntemi İle Cam Alttaşlar Üzerine ZrO_2 İnce Filmlerin Oluşturulması ve Elde Edilen İnce Filmlerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2016.
52. Sert, Y., Yeşilyurt, M., Günaydın, O., Emir, L. T. ve Küçükömeroğlu, T., Dövme Kalıplarında Aşınma Mekanizmaları, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 8, 1 (2021) 202-219.
53. Baptista, A., Silva F., Porteiro J., Míguez J. ve Pinto G., 2018, Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands, Coatings, 8 (2018) 402.
54. Fotovvati, B., Namdari, N. ve Dehghanghadikolaei, A., On Coating Techniques for Surface Protection: A Review, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 3 (2019) 28.
55. Panjan, P. and Čekada M., Zaščita, Orodij s Trdimi PVD-Prevlekami, University of Ljubljana, 79-111, Ljubljana, 2005.
56. Kalkan, N., PVD Yöntemi İle TiN, CrN ve TiN/CrN Kaplanmış Soğuk İş Takım Çeliğinin Aşınma Performanslarının Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2008.
57. Avuncan, G., Talaş Kaldırma Ekonomisi ve Kesici Takımlar, Makine Takım Endüstrisi A. Ş., Gebze, 1998.
58. <https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/aluminum-nitride/>, Ceramic Material with Very High Thermal Conductivity, Tarih: 18:24, 14 Mart 2021.

59. Shahien, M., Yamada M. and Fukumoto, M., Advances in High Temperature Ceramic Matrix Composites and Materials for Sustainable Development; Ceramic Transactions, Book Editor(s): Mrityunjay Singh, Tatsuki Ohji, Shaoming Dong, Dietmar Koch, Kiyoshi Shimamura, Bernd Clauss, Bernhard Heidenreich ve Jun Akedo, Book Series: Ceramic Transactions Series, Volume CCLXIII/Volume, 263, Birinci Baskı, The American Ceramic Society, USA, 2017.
60. Mitsuo, A., Uchida, S., Nihira, N. and Iwaki, M., Improvement of High Temperature Oxidation Resistance of Titanium Nitride and Titanium Carbide Films by Aluminium Ion Implantation, Surface and Coatings Technology, (1998) 98-104.
61. Çalışkan, H., Nanotabakalı AlTiN/TiN Kaplanmış Karbür Kesici Takımların Sert Malzemelerin Frezelenmesinde Aşınma Davranışlarının ve Kesme Performanslarının Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2012.
62. Özet, M., Bazı Metallerin RF Magnetron Sıçratma Yöntemiyle TiN ve TiAlN İle Kaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Merkezi, Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Kayseri, 2008.
63. Sert, Y., Küçükömeroğlu, T. ve Efeoğlu, İ., Investigating the Structure, Adhesion and Tribological Properties of Al and Zr-doped TiN Coatings With Various Substrate Bias Voltage and Working Pressure, Journal of Engineering Tribology, 235, 6 (2021) 1190-1202.
64. Sert, Y., Küçükömeroğlu, T., Asl, G. ve Efeoğlu, İ., Hardness, Adhesion, and Wear Performance of Duplex Treatment Coatings of Nitride/TiAlZrN with Different Zr Target Currents, Journal of Materials Engineering and Performance, MEPEG, 30,1 (2021) 638-651.
65. Erikilili, S., 1040 Çelik Süspansiyon Parçasının Dövme Üretim Prosesinde Çıkan Hataların Belirlenmesi ve İyileştirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2019.
66. Özçiçek, B. G., Burç Üretimi İçin Soğuk Dövme Kalıbı Tasarımı ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2020.
67. Maşat, M., Design and Implementation of Hot Precision Forging Die For A Spur Gear, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.
68. Groover, M. P., Fundamentals of Modern Manufacturing, İkinci Baskı, John Wiley & Sons, 2002.

69. Uddeholms AB Company, Forging Applications, Tooling Application / Hot Work Tooling, Edition: 4, www.uddeholm.com, 2017.
70. Polat, H., Comparisons of Different Methods Used for Improving Life of Hot Forging Dies, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006.
71. Behrens, B. A. and Yilkiran, T., Influence of The Fabrication Method on The Wear Resistance of Hot Forging Dies, Prod. Eng. Res. Devel., 6 (2012) 267-276.
72. Podgornik, B. and Leskovšek, V., Wear Mechanisms and Surface Engineering of Forming Tools, MTAEC9, Materials and Technology, 49, 3 (2015) 313-324, Institute of Metals and Technology, Lepi Pot 11, 1000, Ljubljana, Slovenia.
73. Buchmayr, B., Damage, Lifetime and Repair of Forging Dies, BHM, 162, 3 (2017) 88-93, Montanuniversität Leoben, Leoben, Austria.
74. Hawryluk, M., Gronostajski, Z., Kaszuba, M., Krawczyk, J., Widomski, P., Ziemba, J., Zwierzchowski, M. and Janik, M., Wear Mechanisms Analysis of Dies Used in The Process of Hot Forging A Valve Made of High Nickel Steel, Arch. Metall. Mater., 63, 4 (2018) 1963-1974.
75. Chander, S. and Chawla, V., Failure of Hot Forging Dies - An Updated Perspective, 5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016), Materials Today: Proceedings, 4 (2017) 1147-1157.
76. Gronostajski, Z., Kaszuba, M., Polak, S., Zwierzchowski, M., Niechajowicz, A. and Hawryluk, M., The Failure Mechanisms of Hot Forging Dies, Materials Science & Engineering, A, 657 (2016) 147-160.
77. Gronostajski, Z., Hawryluk, M., Widomski, P., Kaszuba, M., Nowak, B., Polak, S., Rychlik, M., Ziemba, J. and Zwierzchowski, M., Selected Effective Methods of Increasing The Durability of Forging Tools in Hot Forging Processes, Procedia Manufacturing, 27 (2019) 124-129, Department of Metal Forming and Metrology, Wroclaw University of Science and Technology, Wroclaw, Poland.
78. Sirek, F., Deneysel Aşınma Modeli Verileri İçin Uygun Parametre Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015.
79. Wang, L., Su J. F. and Nie, X., Corrosion and Tribological Properties and Impact Fatigue Behaviors of TiN and DLC-coated Stainless Steels in A Simulated Body Fluid Environment, Surface & Coatings Technology, 205 (2010) 1599-1605, Department of Mechanical, Automotive & Materials Engineering, University of Windsor, Windsor/Ontario, Canada.

80. Tan, D. Q., Yang, X. Q., He, Q., Mo, J. L., Zhuang, W. H. and He, J. F., Impact-Sliding Wear Properties of PVD CrN and WC/C Coatings, Surface Engineering, 2019.
81. Chen, Y., Nie, X., Leyland, A., Housden, J. and Matthews, A., Substrate and Bonding Layer Effects on Performance of DLC and TiN Biomedical Coatings in Hank's Solution Under Cyclic Impact–Sliding Loads, Surface & Coatings Technology, 237 (2013) 219-229, Mechanical, Automotive and Materials Engineering, University of Windsor, Windsor/Ontario, Canada.
82. Albaraz, Z., Isıl İşlem Parametrelerinin ve Kimyasal Kompozisyonun Sıcak İş Takım Çeliklerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
83. <https://uslularhadde.com/56-nicrmov-7-celik-ozellikleri>, 56NiCrMoV7 Çelik Özellikleri, Tarih: 19:36, 18 Mart 2021.
84. Özer, M., The Effect of Deep Cryogenic Processing and Tempering Heat Treatment of AISI H13 Tool Steel on Microstructure, Hardness and Impact Energy, GU J Sci, Part C, 7, 3 (2019) 688-699, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
85. Alibey, İ. T., Kalıp Malzemelerinin Uygulama Alanlarına Göre Sınıflandırılması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2010.
86. Sarıkaya, Ö., Nitürleme ve Nitrokarbürleme, Yüzey İşlem ve Kumlama Dergisi, 3, 13 (2010) 36-38.
87. Raghavan, V., Physical Metallurgy Principles and Practice, Birinci Baskı, New Delhi Ltd., New Delhi, 2006.
88. Zha, X., Chen, F., Jiang, F. and Xua, X., Correlation of The Fatigue İmpact Resistance of Bilayer and Nanolayered PVD Coatings With Their Cutting Performance in Machining Tie6Ale4V, Ceramics International, 45 (2019) 14704-14717, Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen, China.
89. Musil, J., Poláková, H., Šuna, J. and Vlček, J., Effect of Ion Bombardment on Properties of Hard Reactively Sputtered Ti(Fe)Nx Films, Surface and Coatings Technology, (2004) 177-178, 289-298.
90. Gural, G., Gazaltı Kaynağında Proses Parametrelerinin Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2003.
91. Taylan, D., Taguchi Deney Tasarımı Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2009.

92. Hörling, A., Hultman, L., Odén, M., Sjölen, J. and Karlsson, L., Mechanical Properties and Machining Performance of $Ti_{1-x}Al_xN$ -Coated Cutting Tools, Surface and Coatings Technology, 191, 2-3 (2005) 384-392.
93. Lugscheider, E., Knotek, O., Barimani, C., Leyendecker, T., Lemmer, O. and Wenke, R., PVD Hard Coated Reamers in Lubricant-Free Cutting, Surface and Coating Technology, 112, 1-3 (1999) 146-151.
94. Pujante Ji, Vilaseca M., Casellas D. and Riera M. D., High Temperature Scratch Testing of Hard PVD Coatings Deposited on Surface Treated Tool Steel, Surface & Coatings Technology, 254 (2014) 352-357.
95. Dua H., Ji, X. H. Z., Wuc Y., Wana W. and Wangaa L., Applied Surface Science, Elsevier, 2013.
96. Yu, C. Y., Tian, L. H., Wei, Y. H., Wang, S. B., Li, T. B. and Xu, B. S., The Effect of Substrate Bias Voltages on Impact Resistance of CrAlN Coatings Deposited by Modified Ion Beam Enhanced Magnetron Sputtering, Applied Surface Science, 255, 7 (2009) 4033-4038.
97. Wang, X., Wang, L. S., Qi, Z. B., Yue, G. H., Chen, Y. Z., Wang, Z. C. and Peng, D., L., Investigation on The Structure and Properties of $Al_xCr_{1-x}N$ Coatings Deposited by Reactive Magnetron Co-Sputtering, Journal of Alloys and Compounds, 502, 1 (2010) 243-249.
98. Raoufi, M., Mirdamadi, S., Mahboubi, F., Ahangarani, S., Mahdipoor, M., S. and Elmkhah, H., Correlation Between The Surface Characteristics and The Duty Cycle for The PACVD-Derived TiN Nanostructured Films, Surface and Coatings Technology, 205, 21-22 (2011) 4980-4984.
99. Kara, L., Yüzeyi İnce Film Kaplanmış 100Cr6 Çeliğinin Çeşitli Ortamlarda Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2009.
100. Gangopadhyay, S., Acharya, R., Chattopadhyay, A. K. and Paul, S., Effect of Substrate Bias Voltage on Structural and Mechanical Properties of Pulsed DC Magnetron Sputtered TiN–MoS_x Composite Coatings, Vacuum, 84, 6, 2010, 843-850.
101. Glatz, S. A., Hollerweger, R., Polcik, P., Rachbauer, R., Paulitsch, J. and Mayrhofer, P. H., Thermal Stability and Mechanical Properties of Arc Evaporated Ti-Al-Zr-N Hard Coatings, Surface & Coatings Technology, 266 (2015) 1-9.

102. Tanga, D., Chen, H., Xiao, W., Deng, H., Zou, S., Ren, Y., Lei, M. and Zhou, X., Substrate Bias Effects on Mechanical Properties and High Temperature Oxidation Performance of Sputtered TiN-coated Zr-4, Journal of Nuclear Materials, 524 (2019) 330-339.
103. Zeng, X. T., TiN/NbN Superlattice Hard Coatings Deposited by Unbalanced Magnetron Sputtering, Surface and Coatings Technology, 113, 1-2 (1999) 75-79.
104. Voevodin, A. A., Capano, M. A., Laube, S. J. P., Donley, M. S. ve Zabinski, J. S., Design of A Ti/TiC/DLC Functionally Gradient Coating Based on Studies of Structural Transitions in Ti-C Thin Films, Thin Solid Films, 298, 1-2 (1997) 107-115.
105. E. W. Niu, L. Li, G. H. Lv, H. Chen, X. Z. Li, X. Z. Yang and S. Z. Yang, Characterization of Ti-Zr-N Films Deposited by Cathodic Vacuum Arc with Different Substrate Bias, Applied and Surface Science, 254, 13 (2008) 3909-3914.
106. Cansever, N., Manyetik Alanda Sıçratma Yönteminde Son Gelişmeler, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mayıs, 2001.
107. Zhang, S., Wang, N., Li, D. J., Dong, L., Gu, H. Q., Wan, R. X. and Sun, X., The Synthesis of Zr-Nb-N Nanocomposite Coating Prepared by Multi-Target Magnetron Co-Sputtering, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 307 (2013) 119-122.
108. Lin, K., L., Hwang, M. Y., and Wu, C. D., The Deposition and Wear Properties of Cathodic Arc Plasma Deposition TiAlN Deposits, Materials Chemistry and Physics, 46, 1 (1996) 77-83.
109. Chaleix, L. ve Machet, J., Study of The Composition and of The Mechanical Properties of Ti-B-N Films Obtained by DC Magnetron Sputtering, Surface and Coatings Technology, 91, 1-2 (1997) 74-82.
110. Wiedemann, R., Weihnacht, V. ve Oettel, H., Structure and Mechanical Properties of Amorphous Ti-B-N Coatings, Surface and Coatings Technology, 116-119 (1999) 302-309.
111. Lopez-Cartes, C., Martinez-Martinez, D., Sanchez-Lopez, J. C., Fernandez, A., Garcia Luis, A., Brizuela, M. ve Onate, J. I., Characterization of Nanostructured Ti B-(N) Coatings Produced by Direct Current Magnetron Sputtering, Thin Solid Films, 515, 7-8 (2007) 3590-3596.
112. Gautier, C. and Machet, J., Study of The Growth Mechanisms of Chromium Nitride Films Deposited by Vacuum Arc Evaporation, Thin Solid Films, 295, 1-2 (1997) 43-52.

113. Senna, L. F., Achete, C. A., Hirsch, T. and Freire Jr, F. L., Structural, Chemical, Mechanical and Corrosion Resistance Characterization of TiCN Coatings Prepared by Magnetron Sputtering, Surface and Coatings Technology, 94-95 (1997) 390-397.
114. Lin, J., Moore, J. J., Mishra, B., Pinkas, M., Sproul, W. D. ve Rees, J. A., Effect of Asynchronous Pulsing Parameters on The Structure and Properties of CrAlN Films Deposited by Pulsed Closed Field Unbalanced Magnetron Sputtering (PCFUBMS), Surface and Coatings Technology, 202, 8 (2008) 1418-1436.
115. Sellers, J., Asymmetric bipolar pulsed DC: The Enabling Technology for Reactive PVD, Surface Coating Technology, 98 (1998) 1245.
116. Kusaka, K., Taniguchi, D., Hanabusa, T. ve Tominaga, K., Effect of Sputtering Gas Pressure and Nitrogen Concentration on Crystal Orientation and Residual Stress in Sputtered AlN films, Vacuum, 66, 3-4 (2002) 441-446.
117. Ohring, M., Materials Science of Thin Films-Deposition & Structure, 357-414, 495-556, 723-750, Academic Press, San Diego, 2002.
118. Maksakova, O., Simoões, S., Pogrebnyak, A., Bondar, O., Kravchenko, Y., Beresnev, V. and Erdybaeva, N., The Influence of Deposition Conditions and Bilayer Thickness on Physicalmechanical Properties of CA-PVD Multilayer ZrN/CrN Coatings, Materials Characterization, 140 (2018) 189-196.
119. Esquivel-Puentes, H. A., Fisher, T. C., Capote, G. and Olaya, J. J., Bias Effects on Wear and Corrosion Behavior of Amorphous Hydrogenated Carbon Films with Zirconia Interlayer, Surface & Coatings Technology, 350 (2018) 603-620.
120. Wu, W., Chen, Z., Lin, X., Li., B. and Cong, X., Effects of bias voltage and gas pressure on orientation and microstructure of iridium coating by double glow plasma, Vacuum, 86 (2011) 429-437.
121. Yanhui, Z., Shengsheng, Z., Ling, R., Denisov, V. V., Koval, N. N. Ke, Y. and Baohai, Y., Effect of Substrate Pulse Bias Voltage on the Microstructure and Mechanical and Wear-resistant Properties of TiN/Cu Nanocomposite Films, Rare Metal Materials and Engineering, 47, 11 (2018) 3284-3288.
122. Zegtouf., H., Saoula, N., Azibi, M., Bait, L., Madaoui, N., Khelladi, M. R. and Kechouane, M., Influence of Substrate Bias Voltage on Structure, Mechanical and Corrosion Properties of ZrO₂ Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Sputter Deposition, Surface & Coatings Technology, 393 (2020) 125821.

123. Haršáni, M., Ghafoor, N., Calamba, K., Zacková, P., Sahul, M., Vopát, T., Satrapinskyy, L., Čaplovičová, M. and Čaplovič, L', Adhesive-deformation Relationships and Mechanical Properties of nc-AlCrN/a-SiN_x Hard Coatings Deposited at Different Bias Voltages, Thin Solid Films, 2017.
124. Berni, M., Marchiori, G., Gambardella, A., Boi, M., Bianchi, M., Russo, A., Visani, A., Marcacci, M., Pavan, P., G. and Lopom, N. F., Effects of Working Gas Pressure on Zirconium Dioxide Thin Film Prepared by Pulsed Plasma Deposition: Roughness, Wettability, Friction and Wear Characteristics, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 72 (2017) 200-208.
125. Ding, J. C., Wang, Q. M., Liu, Z. R., Jeong, S., Zhang, T. F. and Kim, K. H., Influence of Bias Voltage on The Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of AlSiN Films Deposited by HiPIMS Technique, Journal of Alloys and Compounds, 772 (2019) 112-121.
126. Wang, Z. W., Li, Y., Zhang, Z. H., Zhang, S. Z., Ren, P., Qiu, J. X., Wang, W. W., Bi, Y. J. and He Y. Y., Friction and Wear Behavior of Duplex-treated AISI 316L Steels by Rapid Plasma Nitriding and (CrWAlTiSi)N Ceramic Coating, Results in Physics, 24 (2021) 104132.
127. Tillmann, W., Wittig, A., Stangier, D., Moldenhauer, H., Thoman, C. A., Debus, J., Aurich, D. and Bruemmer, A., Influence of The Bias-voltage, The Argon Pressure and The Heating Power on The Structure and The Tribological Properties of HiPIMS Sputtered MoS_x films, Surface & Coatings Technology, 385 (2020) 125358.
128. Yumusak, G., Leyland, A. and Matthews, A., The Effect of Pre-deposited Titanium-based PVD Metallic Thin Films on The Nitrogen Diffusion Efficiency and Wear Behaviour of Nitrided Ti Alloys, Surface & Coatings Technology, 394 (2020) 125545.
129. H. Guo, N. C. Wu, Y. L. Zhang, S. D. Zhang, W. H. Sun and J. Q. Wang, Influence of Coating Thickness on The Impact Damage Mode in Fe-based Amorphous Coatings, Surface & Coatings Technology, 390 (2020) 125650.
130. Fang, Z., Chen, J., He, W., Yang, Z., Yuan, Z., Geng, M. and He, G., Study on The Damage Mechanism of TiN/Ti Coatings Based on Multi-Directional Impact, Coatings, 9, 765 (2019).
131. Tan, D., Mo, J., He, W., Luo, J., Zhang, Q., Zhu, M. and Zhou, Z., Suitability of Laser Shock Peening to Impact-Sliding Wear in Different System Stiffnesses, Surface & Coatings Technology, 358 (2019) 22-35.

132. Łępicka, M., Małgorzata, G. D., Pieniak, D., Pasierbiewicz, K., Kryńska, K. and Niewczas, A., Tribological Performance of Titanium Nitride Coatings: A Comparative Study on TiN-coated Stainless Steel and Titanium Alloy, Wear, 422-423 (2019) 68-80.
133. Bhosale, D. G., T., R., Rathod, W., S., Sliding and Erosion Wear Behaviour of Thermal Sprayed WC-Cr₃C₂-Ni Coatings, Surface & Coatings Technology, 400 (2020) 126192.
134. Küçük, Y., Effect of Counterbody on The Dry Sliding Wear Performance of Plasma Sprayed Calcia-Stabilized Zirconia Coating, International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 92 (2020) 105284.
135. Chen, Y., Nie, X., Study on Fatigue and Wear Behaviors of a TiN Coating Using An Inclined Impact-Sliding Test, Surface & Coatings Technology, 206 (2011) 1977-1982.
136. J. F. Su, D. Yu, X. Nie, H. Hu, Inclined Impact–Sliding Wear Tests of TiN/Al₂O₃/TiCN Coatings on Cemented Carbide Substrates, Surface & Coatings Technology, 206 (2011) 1998-2004.
137. Joshy, S., Jayadevan, K. R., Ramesh, A. and Mahipal, D., Influence of Loading Conditions on Wear Behaviour of H11 Tool Steel, World Journal of Engineering, Sayı: 16, 5 (2019) 614-624.
138. Akyıldız, E., Altay, M., Muhaffel, F., Özkurt, S., Atar E. ve Çimenoglu, H., Impact-Sliding Wear Behaviour of Nitrided H13 Steel Tool Steels, Key Engineering Materials, 813 (2019) 417-422, Trans Tech. Publications Ltd, Switzerland.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimlerini Trabzon'da tamamladı. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazanarak 2010 yılında Makine Mühendisi unvanı ile lisans öğrenimini tamamladı. Sonrasında 2010-2011 yılları arasında Sakarya Organize Sanayi Bölgesinde Barışsan Makina'da Ar-Ge Mühendisi olarak çalıştı. Ardından 2013-2019 yılları arasında Trabzon'da Organize Sanayi Bölgesinde Çolakoğlu Makina'da Proje, Tasarım ve Ar-Ge Mühendisi ve şirket bünyesinde Ar-Ge Merkezinin kurulmasını sağladıktan sonra Ar-Ge Merkezi Koordinatörü olarak görev yaptı. Ar-Ge Merkezi Koordinatörü olarak sektörde birçok Ar-Ge projesinin geliştirilmesini ve gerçekleştirilmesini sağladı. 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans eğitimi boyunca "Sıcak Dövme Kalıbının Kullanım Ömrünü Artırmak Amaçlı Kaplama Tabakası Geliştirilmesi" başlıklı 1505 Üniversite-Sanayi İşbirliği TÜBİTAK projesinde ve "İnovatif Darbeli-Kayma Aşınma Triboloji Test Cihazı" başlıklı BAP projesinde araştırmacı ve tasarımcı olarak görev aldı. "Dövme Kalıplarında Aşınma Mekanizmaları" başlıklı makale, "Wear Performance of New Designed h-BN Based PVD Coatings" ve "Hardness and Adhesion Properties of PVD-(Ti, Cr, Nb)-hBN" başlıklı bildiri yayınları bulunmaktadır.