İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM MATRİSLİ SERAMİK PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN PLAZMA PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Ahmet Sacit EROĞLU

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı: Malzeme Mühendisliği

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM MATRİSLİ SERAMİK PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN PLAZMA PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Ahmet Sacit EROĞLU
(506041425)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU (İ.T.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Eyüp Sabri KAYALI (İ.T.Ü)
Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Alüminyum metal matrisli seramik partikül takviyeli kompozit kaplamaların, kimyasal yağ yerine su ile yağlanabilirliğini araştırdığım çalışmamın karakterizasyon aşaması, İ.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesindeki laboratuarlarda yapılmıştır. Kompozit tozlar, Yüksek Teknoloji Malzemeleri Ar-Ge A.Ş. laboratuarlarında hazırlanmıştır. Kaplamaların üretimi Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Plazma Kaplama Laboratuarı'nda yapılmıştır.

Çalışmalarım esnasında, beni sürekli yönlendiren, sahip olduğu bilgi ve deneyimleri çalışmama aktaran, gösterdiği ilgi ile çalışmanın hedefine ulaşmasını sağlayan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na en içten duygularımla teşekkürlerimi sunarım. Sakarya Üniversitesi bünyesindeki Plazma Sprey Laboratuarı imkanlarını kullanımıma açan, çalışmam boyunca, çeşitli fikir, öneri ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocam Doç. Dr. Fatih ÜSTEL'e harcadığı zaman ve emekten dolayı teşekkürü borç bilirim.

Yüksek Teknoloji Malzemeleri Ar-Ge A.Ş.'nin laboratuar imkanlarını kullanmamı sağlayan, Ynt.Kur.Bşk.Yrd. Sayın H.Sabahattin ERGÖNENÇ'e çalışmama verdiği destekten dolayı teşekkür ederim. Çalışmalarım esnasında vakitlerini ayırarak çalışmalarıma hız veren Arş. Gör. Fırat EŞİT'e, Arş. Gör. Onur MEYDANOĞLU'na ve yükseköğrenim hayatım boyunca desteğini hissettiğim, yaptığımız bilgi alışverişleriyle ufkumu genişleten değerli dostum Met. ve Malz. Müh. Tunç ERGÖNENÇ'e teşekkür ederim.

Her türlü maddi ve manevi özveride bulunarak bugünlere gelmemde büyük katkıları olan, her konuda beni daima destekleyen en büyük zenginliğim; aileme, her zaman derin bir minnet ve şükran borçluyum.

Haziran, 2008 Ahmet Sacit EROĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
ÖZET x
SUMMARY xi

1. GİRİŞ ve AMAÇ 1

2. PLAZMA PÜSKÜRTME KAPLAMA TEKNİĞİ 2

2.1. Giriş 2

2.2. Plazmanın Tanımı ve Oluşumu 3

2.3. Plazma Püskürtme Sistemi 5

2.3.1. Güç Ünitesi 7
2.3.2. Toz Besleme Ünitesi 7
2.3.3. Gaz Besleme Ünitesi 7
2.3.4. Püskürtme Tabancası 8

2.4. Plazma Püskürtme Gazları 9

2.4.1. Argon 9
2.4.2. Azot 9
2.4.3. Hidrojen 9
2.4.4. Helyum 9

2.5. Plazma Püskürtme Kaplama Tekniğinin Çeşitleri 11

3. PLAZMA PÜSKÜRTME KAPLAMALARIN ÖZELLİKLERİ 13

3.1. Giriş 13

3.2. Kaplama Tabakalarının Oluşumu 13

3.3. Plazma Püskürtme Kaplamaların Özellikleri 15

3.3.1. Mikroyapı 15
3.3.2. Gözenek ve Yoğunluk 15
3.3.3. Yapışma Mukavemeti 15
3.3.4. İç Gerilmeler 16
3.3.5. Sertlik 16
3.3.6. Yüzey Pürüzlülüğü 16

3.4. Plazma Püskürtme Kaplama Tekniğinin Uygulama Alanları 17

4. SERAMİKLERİN SU İÇİNDEKİ AŞINMA DAVRANIŞLARI **18**
4.1. Giriş **18**
4.2. Si_3N_4 ve SiC Seramiklerin Su İçindeki Aşınma Davranışı **19**
4.3. Su İçinde Tribokimyasal Film Oluşumu **23**
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **24**
5.1. Çalışmanın Tanımlanması ve Amacı **24**
5.2. Plazma Püskürtme Kaplama Uygulaması **24**
5.3. Kaplamaların Karakterizasyonları **27**
5.4. Aşınma Deneyleri **29**
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME **32**
6.1. Kaplama Karakterizasyonu Sonuçları **32**
6.2. Aşınma Deneyi Sonuçları **33**
7. GENEL SONUÇLAR **42**
KAYNAKLAR **43**
EKLER **45**
ÖZGEÇMİŞ **81**

KISALTMALAR

APS : Atmospheric Plasma Spray Process
UDDP : Ultra Dispersed Diamond Powder
XRD : X-Ray Diffraction
SEM : Scanning Electron Microscope
OM : Optical Microscope

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1 Plazma püskürtme tekniği uygulama alanları 17
Tablo 5.1 Kaplama uygulamasında kullanılan püskürtme parametreleri 24
Tablo 5.2 Kumlama işlemi parametreleri 25
Tablo 5.3 Toz numunesi karışım oranları ve ortam koşulları 27
Tablo 6.1 Kaplamaların ortalama kalınlık, sertlik ve %SiC, % Al-12Si, %Porozite değerleri 32
Tablo 6.2 Altlık malzemenin ve kaplamaların deney yüküne bağlı kuru ve sıvı ortam aşınma hacimleri 33
Tablo 6.3 Kaplamaların 1N, 2N, 3N ve 5N yükte kuru ve sıvı ortam koşullarında kararlı sürtünme geçiş katsayıları 37
Tablo 6.4 Kaplamaların 1N, 2N, 3N ve 5N yükte kuru ve sıvı ortam koşullarında kararlı sürtünme katsayıları 37
Tablo A.1 Kaplamaların ölçülen sertlik, ortalama sertlik ve standart sapma değerleri. 45
Tablo B.1 Kuru ve sulu ortam sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilya ile yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin ölçüm değerleri 65
Tablo B.2 Kuru ve sulu ortam sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilya ile yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin ortalama boyutları ve hacmi 66

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Elektrik ark mekanizması 3
Şekil 2.2: Plazma ışınındaki mesafeye bağlı sıcaklık dağılımı; a) laminer akış, b) türbilanslı akış, c) argon ve d) azot gazı sıcaklık mukayeseleri..... 4
Şekil 2.3: Plazma sprey sisteminin şematik gösterimi 6
Şekil 2.4: Plazma püskürtme tabancası ve kaplama sisteminin şematik görünümü 8
Şekil 2.5: Plazma püskürtme tabancası genel görünümü. 8
Şekil 2.6: Plazma gazlarının a) Relatif mol ağırlığı, b) Özgül ağırlık ve c) Termal iletkenlik katsayısı özelliklerinin karşılaştırılması 10
Şekil 2.7: Plazma gazlarının a) ark gerilimi, b) ark girişi özelliklerinin karşılaştırılması. 10
Şekil 2.8: Plazma gazlarının a) Özgül ısı kapasitesi, b) İyonizasyon potansiyeli ve c) sıcaklık özelliklerinin karşılaştırılması..... 11
Şekil 3.1: Plazma işleminde toz partiküllerin deformasyonu ve püskürtülen yüzeye bağlanması..... 14
Şekil 4.1: Saf su ile yağlanan Si_3N_4-Metal kayma çifti sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı değişimi..... 19
Şekil 4.2: Saf su ile yağlanan Si_3N_4-Metal kayma çifti toplam aşınma miktarının kayma mesafesine bağlı değişimi 20
Şekil 4.3: Su içinde yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı değişimi..... 21
Şekil 4.4: Su içinde yapılan aşınma deneylerinde ortalama sürtünme katsayısının(μ_{av}) kayma hızına bağlı değişimi 22
Şekil 4.5: Su içinde yapılan aşınma deneylerinde aşınma oranının, kayma hızına ve deney yüküne bağlı değişimi..... 22
Şekil 5.1: Karıştırma ortamları ve karıştırma kapları genel görünümü. (a) Rotasyonel karıştırıcı, (b) Rotasyonel karıştırıcı kabı, (c) Planeter karıştırıcı, (d) Planeter karıştırıcı kabı, (e) Geleneksel karıştırıcı, (f) Geleneksel karıştırıcı kabı..... 26
Şekil 5.2: Tribotechnic firması tarafından üretilen Tribotester aşınma test cihazı genel görünümü..... 29
Şekil 5.3: (a) kuru ve (b) sıvı ortam aşınma deneyi ortamı genel görünümleri..... 30
Şekil 5.4: Aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi.... 30
Şekil 5.5: Sürtünme katsayısı grafiği üzerinde kararlı sürtünme katsayısı ve kararlı sürtünme geçiş katsayısının belirlenmesi..... 31
Şekil 6.1: Aşınma testi uygulanan ND4, ND8 ve ND10 kodlu kaplamaların optik mikroskop yüzey ve kesit fotoğrafları 34

Şekil 6.2: ND4, ND8 ve ND10 kodlu kaplamalar için X-ışınları difraksiyometresi sonuçları, (1:Al-Si, 2:SiC)..... 35
Şekil 6.3: (a) Kuru ve (b) saf sulu ortamlarda Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde aşınma hacimlerinin deney yükü ile değişimi..... 36
Şekil 6.4: ND4, ND8 ve ND10 kodlu numuneler için kuru ve saf su ortamı koşullarında kararlı, sürtünme katsayısı ve geçiş katsayısı..... 38
Şekil 6.5: ND4 kodlu numune için 1N yük altında (a) kuru ve (b) saf su ortamı koşullarında oluşan aşınma izlerinin OM fotoğrafları..... 39
Şekil 6.6: ND4, ND8 ve ND10 kodlu numunelerin (a)1N, (b)2N, (c)3N ve (d)5N'da karşılaştırmalı %SiC-Aşınma Hacmi grafikleri..... 40
Şekil 6.7: ND4, ND8 ve ND10 kodlu numunelerin (a)1N, (b)2N, (c)3N ve (d)5N'da karşılaştırmalı %SiC-Kararlı Sürtünme Katsayısı grafikleri..... 41
Şekil A.1: Kaplamaların optik mikroskop kesit fotoğrafları; (a) ND1, (b) ND2, (c) ND3, (d) ND4, (e) ND5, (f) ND6, (g) ND7, (h) ND8, (i) ND9, (j) ND10..... 46
Şekil A.2: Kaplamaların optik mikroskop yüzey fotoğrafları; (a) ND1, (b) ND2, (c) ND3, (d) ND4, (e) ND5, (f) ND6, (g) ND7, (h) ND8, (i) ND9, (j) ND10..... 48
Şekil A.3: ND3 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200)..... 50
Şekil A.4: ND4 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200)..... 51
Şekil A.5: ND5 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200)..... 52
Şekil A.6: ND6 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200)..... 53
Şekil A.7: ND7 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200)..... 54
Şekil A.8: ND8 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200)..... 55
Şekil A.9: ND9 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200)..... 56
Şekil A.10: ND10 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200)..... 57
Şekil B.1: ND4 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri SEM görüntüleri..... 58
Şekil B.2: ND8 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri SEM görüntüleri..... 59
Şekil B.3: ND10 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri SEM görüntüleri..... 60
Şekil B.4: Alüminyum altlık aşınma deneyi için kullanılan Al_2O_3 karşı malzemenin 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma yüzeyleri OM görüntüleri (X50)..... 61
Şekil B.5: ND4 kodlu numunenin aşınma deneyi için kullanılan Al_2O_3 karşı malzemenin 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma yüzeyleri OM görüntüleri (X50)..... 62

Şekil B.6: ND8 kodlu numunenin aşınma deneyi için kullanılan Al_2O_3 karşı malzemenin 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma yüzeyleri OM görüntüleri (X50)..... 63
Şekil B.7: ND10 kodlu numunenin aşınma deneyi için kullanılan Al_2O_3 karşı malzemenin 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma yüzeyleri OM görüntüleri (X50) 64
Şekil B.8: ND4 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X100) 67
Şekil B.9: ND8 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X100) 68
Şekil B.10: ND10 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X100)..... 69
Şekil B.11: ND4 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X500)..... 70
Şekil B.12: ND8 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X500)..... 71
Şekil B.13: ND10 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X500)..... 72
Şekil B.14: 2014-T4 alüminyum altlık için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi 73
Şekil B.15: ND4 kodlu numune için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi 75
Şekil B.16: ND8 kodlu numune için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi 77
Şekil B.17: ND10 kodlu numune için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi 79

ALÜMİNYUM MATRİSLİ SERAMİK PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT KAPLAMALARIN PLAZMA PÜSKÜRTME TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ VE AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle hafif endüstriyel ürünler içerisinde, özellikle otomobil ve hızlı taşıma sistemlerinde önemli bir yere sahip olan alüminyum alaşımlarının aşınma direncinin düşük olması bu malzemelerin daha yaygın kullanımını sınırlamaktadır. Alüminyum alaşımlarının Al_2O_3 ve SiC gibi partiküllerle takviye edilmesi (metal matrisli kompozit), sertlik ve mukavemetin yanısıra aşınma direncini de önemli oranda arttırmaktadır.

Mükemmel kaplama özellikleri ve yüksek işlem sıcaklığı ile plazma püskürtme kaplama tekniği, uygulamalarda genişçe yer bulmaktadır. Yüksek işlem sıcaklığının sağladığı ergitme gücü ile çok yüksek sıcaklıklarda ergiyen oksitli bileşikler dahi bu teknik sayesinde metalik altlık malzeme üzerine rahatlıkla biriktirilmektedir. Bunun yanısıra yüksek işlem sıcaklığı ergime noktası düşük bileşikler için uygulanabilirliği azaltmaktadır. Plazma püskürtme kaplama tekniği, endüstüriyel olarak; tekstil sektöründe, otomotiv sektöründe, uzay araçlarında, türbin kanatlarında, yanma odalarında, dizel motorlarda ve daha bir çok alanda aşınma dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyon dayanımı sağlama amaçlı kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, 2014-T4 kalite alüminyum alaşımının yüzeyinin plazma püskürtme tekniği ile alüminyum matrisli SiC partikül takviyeli kompozit kaplanarak aşınma direncinin arttırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, kaplama yapısını oluşturacak olan, Al-12Si ve SiC tozları çeşitli oran ve parametrelerde karıştırılmış, kaplama uygulaması esnasında SiC toz kaybının engellenmesine ve kaplama yapısı içinde birikiminin arttırılmasına çalışılmıştır. Daha sonra, farklı oranda SiC partikül içeren 3 kaplama numnesi seçilmiş, kaplamaların kuru ortam koşulları ve saf su içerisindeki aşınma davranışları incelenmiştir. Plazma püskürtme kaplama uygulaması atmosferik plazma püskürtme sisteminde (APS), aşınma deneyleri karşı yüklemeli (reciprocating) aşınma test cihazında gerçekleştirilmiş olup, aşındırıcı olarak Al_2O_3 toplar kullanılmıştır.

Kaplama işlemi öncesi uygulanan toz karıştırma işlemleri, yapı içerisindeki karbür oranını arttırmada etkili olmuştur. SiC takviyeli kompozit kaplamalar, uygulandığı altlık malzemenin sertliğini oldukça arttırmıştır. SiC oranı en yüksek olan kaplama en yüksek sertliğe, SiC oranı en düşük olan kaplama en düşük sertliğe sahiptir. Seçilen üç kaplamanın kuru ve saf su ortamı aşınma dirençlerinin altlık malzeme 2014-T4 alüminyuma göre oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca genel olarak saf su içerisinde kuru ortama nazaran kaplamaların sürtünme katsayısının düştüğü ve aşınma dirençlerinin arttığı görülmüştür.

PRODUCTION OF CERAMIC REINFORCED ALUMINIUM MATRIX COMPOSITE COATINGS BY PLASMA SPRAY TECHNIQUE AND INVESTIGATION OF THEIR WEAR BEHAVIOUR

SUMMARY

Aluminium alloys play an important role in light industrial products, especially in automobile systems and high speed transportation due to their high strength/weight ratio. However, they are limited in use, since they have low wear resistance. Reinforcing aluminium alloys with particulates such as Al_2O_3 and SiC, enhances their wear resistance as well as hardness and strength significantly.

Plasma spray coating technique is used frequently in applications due to its excellent coating properties and high operating temperatures. The high operating temperature, exceeds the melting temperature of even oxidized compounds, which provides the ability to deposit those compounds on the surfaces of metallic substrate materials, but limits the use of compounds with low melting temperatures. Plasma spray coating technique is employed in automotive industry, textile industry and also in space shuttles, especially in turbine blades and burn chambers, to improve their thermal properties in addition to enhancing corrosion and wear resistance.

In this study, it is aimed to increase the wear resistance of the quality 2014-T4 aluminium alloys coated with the composite reinforced aluminium matrix SiC particulate by plasma spray technique. Mixtures of Al-12Si and SiC powders with differing rates and parameters are prepared in order to minimize SiC powder loss, while forcing the powders to be collected inside the coating structure. Three coating specimens containing different SiC powder compositions are selected to analyze their wear behaviour in dry sliding and distilled water conditions. Plasma spray coating is performed with the atmospheric plasma spray system (APS). Abrasion tests are executed in reciprocating wear tester, and Al_2O_3 balls are used as abrasives.

Mixing the powders before the coating operation, succeded in increasing the overall carbide rate in the structure. SiC reinforced composite coatings are able to improve the hardness of the substrate material significantly. The hardness of coatings are proportional to the SiC rate they contained. It is observed that dry sliding and distilled water condition wear resistances of three chosen coatings are considerably better than the metalic substrate 2014-T4 aluminium. It is also found that in general, the friction coefficent decreases on contrary to the increasing wear resistance.

1. GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek elektrik iletkenliği, yüksek termal iletkenlik ve mükemmel korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle kimya, otomobil ve havacılık endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Ancak, sertlik ve mukavemetlerinin düşük olması bu malzemelerin tribolojik uygulamalardaki kullanımını sınırlamaktadır. Alüminyum ve alaşımlarına çeliklerde olduğu gibi difüzyonlu sertleştirme yöntemleri (karbürleme, nitrürleme) uygulamak mümkün olmasa da sert anodizasyon, elektrokaplama ve fiziksel buhar biriktirme gibi çeşitli yüzey işlemleri ile aşınma direncini geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Ancak oluşturulan ince yüzey tabakası özellikle yüksek yüklerde kolayca kırılmakta ve aşınma direncine olumlu katkı sağlayamamaktadır.

Malzemelerin aşınma direncini geliştirmek amacıyla 20.yy'nin başından beri kullanılmakta olan bir diğer yüzey işlemi ise ısıl püskürtmedir. Bu yöntemin esası; toz, tel veya çubuk halindeki kaplama malzemesinin ergiyik yada kısmi ergiyik duruma getirilerek, kaplanacak yüzeye olabildiğince hızlı bir şekilde püskürtülmesine dayanır. Bu yöntemle malzeme yüzeyinde kalın ve sert kaplamalar oluşturulmakta, hafif metal ve alaşımlarının aşınma direncinin geliştirilmesinde ince kaplamalara nazaran daha başarılı sonuç elde edilmektedir [1].

Bu çalışmada, yaygın kullanıma sahip olan 2014 kalite alüminyum alaşımın direncine, plazma püskürtme tekniği ile uygulanan alüminyum matrisli ve SiC partikül takviyeli kompozit kaplamaların etkisi, kuru ve saf su ortamı içerisinde incelenmiştir.

2. PLAZMA PÜSKÜRTME KAPLAMA TEKNİĞİ

2.1 Giriş

Plazma püskürtme ile kaplama sistemi, bilinen herhangi bir malzeme tozunun ergime sıcaklığının çok üzerinde sıcaklığa sahip gaz plazması içerisinde ergitilmesi ve çok hızlı bir şekilde kaplanacak altlık malzeme yüzeyine püskürtülmesiyle gerçekleşmektedir. Plazma püskürtme ile kaplama yöntemi üretimim devamlılığına ve malzemelerin bulundukları ortamdaki kabiliyetlerini arttırmaya yönelik çalışmaların teknolojik bir ürünüdür. Bu amaçlara yönelik olarak geliştirilen plazma püskürtme teknolojisindeki temel fikir; maliyeti çok yüksek olmayan bir altlık malzeme üzerine, kendisinden daha pahalı ve üstün özelliklere sahip ince bir film tabaka oluşturularak, hem maliyetten kazanç hem de malzemenin bulunduğu ortamdaki kabiliyetlerini arttırmaktır. Bu yöntem ile metaller, seramikler, plastikler, sermetler ve bunların birleşimleri rahatlıkla püskürtülmektedir [2-3].

Plazma püskürtme tekniği ile metaller çeşitli tozlarla kaplanarak; aşınmaya, oksitlenmeye, korozyona ve ısıya daha dayanıklı hale getirilirler ve bu esnada metalin tüm özellikleri de korunmaktadır. Bu teknoloji aşınma ve ısı etkisiyle bölgesel olarak deforme olmuş alanların tamiratına da imkân sağlar [3].

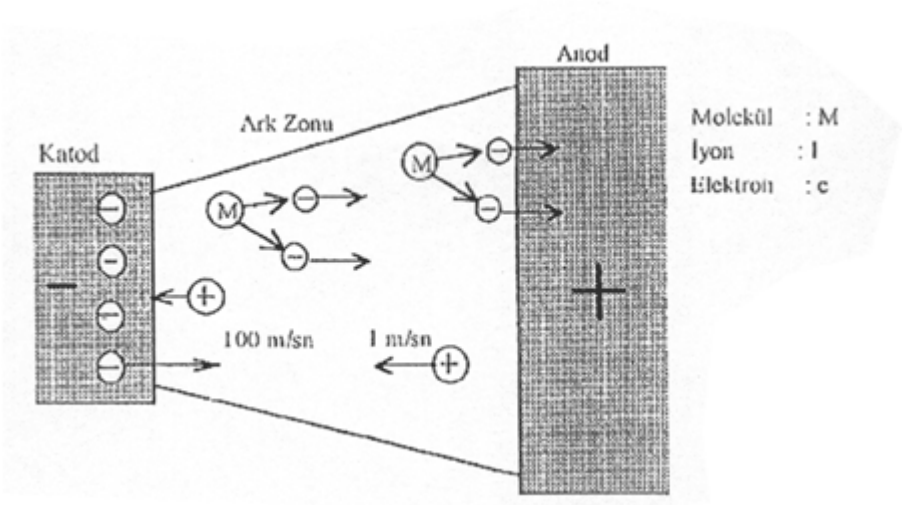
Plazma püskürtme tekniği, geniş aralıkta malzeme seçimi ve bunların endüstri alanlarına yönelik uygulanabilmesi dolayısıyla oldukça ilgi çeken bir alandır. Plazma püskürtme tekniği bir çok alt gruptan meydana gelmiştir ve bunların endüstriye yönelik olarak en yaygın kullanılanı, seramik ve metalik malzemeler için kullanılabilen "Atmosferik Plazma Püskürtme" tekniğidir [4].

Atmosferik plazma püskürtme tekniği ve diğer plazma püskürtme tekniklerinde olduğu gibi, kaplama katmanının içerisindeki yapışma mukavemeti, iç gerilmeler ve boşluklu yapı kaplamanın özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir. Bu etkenlerin kontrol edilebilmesi ile plazma kaplama teknolojisinin zaten çok geniş olan uygulanabilirlik yelpazesinin daha da genişleyeceği öngörülebilir.

2.2 Plazmanın Tanımı Ve Oluşumu

Genel itibariyle plazma teriminin tanımlanması istenirse, bilinen gaz halinden daha yüksek enerji seviyesine ulaşmış bir gaz halini tanımlamamız yerinde olur. Bu gaz hali yoğunlaştırılmış olup maddenin dördüncü hali olarak bilinir ve eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulundurur [3,4].

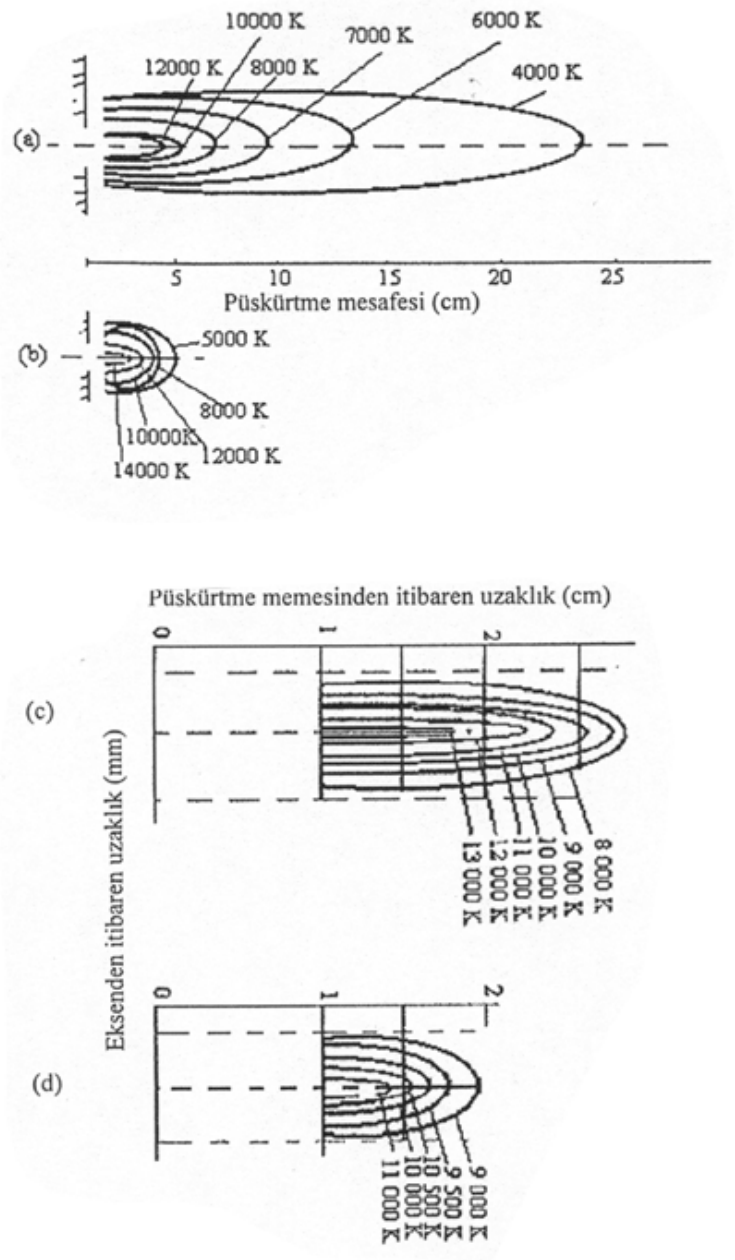
Bilinen gazlar elektriksel olarak yalıtkan iken plazma hali ise iletken bir yapı göstermektedir. Plazmanın başlangıcında elektrik arkında iki kutup arasındaki gaz iyonize olduktan sonra akım meydana gelir ve ark meydana gelir. Anot ve katot arasında tatbik edilen elektrikli gerilim sonucu elektronlar eksi kutuptan artı kutuba doğru, iyonlar ise eksi kutuptan artı kutuba doğru hareket ederler, bu elektrik ark mekanizması Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir [4,5].



Şekil 2.1: Elektrik ark mekanizması [5].

Bir elektrik arkında anot önünde elektronlar, katot önünde iyonlar bir bulut şeklinde birikir. Elektronların anoda geldikleri andaki kinetik enerjileri, hızlarının fazla olması nedeniyle yüksektir. Bu enerji anoda aktarıldığı zaman meydana gelen sıcaklık katottan çok daha yüksektir. Sonuç olarak anot ve katottan oluşan, iki elektrot arasındaki bölgede maddenin dördüncü hali olan "plazma" oluşur [2].

Plazma ışınının başlıca özellikleri, plazma çıkışındaki sıcaklık ve hız değerleridir. Plazma ışınındaki mesafeye bağlı sıcaklık dağılımı, laminer akış, türbilanslı akış, argon ve azot gazı, parametrelerine göre Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Plazma ışınındaki mesafeye bağlı sıcaklık dağılımı; a) laminer akış, b) türbilanslı akış, c) argon ve d) azot gazı sıcaklık mukayeseleri [2].

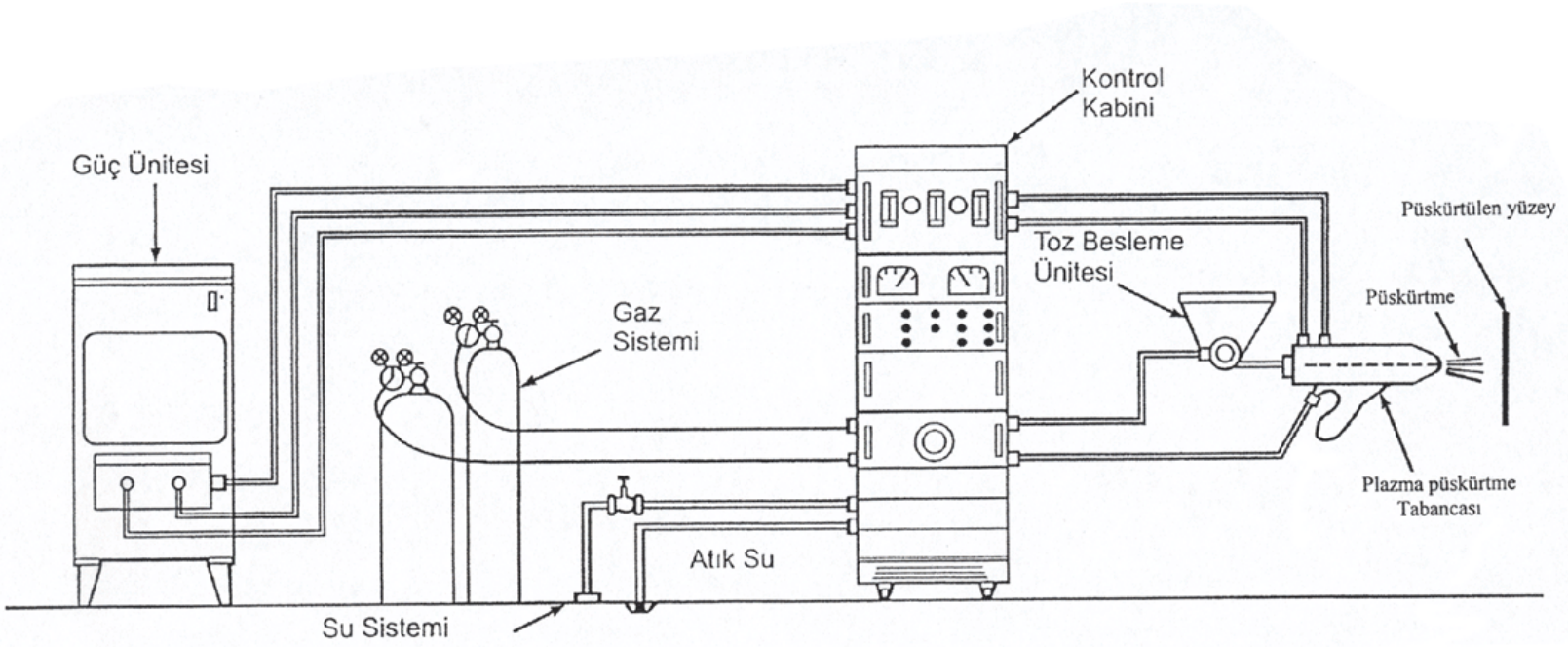
Plazma ışınının hızı direkt olarak akış hızı ve indirekt olarakda nozul çapının karesiyle orantılıdır. Plazma ışınının hızı, taşıyıcı gazın akış hızının artmasıyla önemli derecede etkilenir ve böylece plazma sıcaklığı ve hızı azalır. Modern plazma püskürtme cihazında, plazma ışınının çıkış hızı ses hızının kat kat üstündedir. Plazma ışını, yüksek sıcaklıklarla birlikte oldukça yüksek hızla beslenen tozları ergitmek ve püskürtmek için uygulanmaktadır [2,3].

2.3 Plazma Püskürtme Sistemi

Plazma ile püskürtme sistemi ısı kaynağı olarak oluşan elektrik arkını kullanır. Bu ark genellikle argon, azot veya helyum olan soygazı çok yüksek sıcaklıklara ısıtır. 20000 dereceden çok daha fazla gaz sıcaklığı meydana gelir. Bu durum, gaz moleküllerinin atomsal ayrışmasına sebep olur ve iyonize olan atom sayısı belirli oranda artar. Yüksek sıcaklıktan dolayı gaz hacmi genleşir böylece memeden gaz yüksek hızla çıkar. Kaplama malzemesi,yüksek enerjili plazma ortamına taşıyıcı bir gaz yardımıyla toz şeklinde enjekte edilir. Sonuç olarak sistem içersinde eriyen ve hızlandırılan toz tanecikleri önceden hazırlanmış altlık malzeme yüzeyine püskürtülür [4].

Klasik bir plazma püskürtme sistemi genel olarak :
-Güç ünitesi,
-Gaz besleme ünitesi,
-Toz besleme ünitesi,
-Soğutma sistemi,
-Püskürtme tabancası ve
-Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.

Bu sistemin şematik gösterimi Şekil 2.3'de gösterilmektedir [2].



Şekil 2.3: Plazma sprey sisteminin şematik gösterimi [2].

Bu yöntemde, doğru akım elektrik arkı, meme ile elektrot arasında oluşur. Püskürtme tabancası, kaplama sisteminin en önemli ünitesidir. Anot olarak saf bakır ve katot olarakda %2 ThO_2 katkılı W'ın kullanıldığı tabancada plazma bu elektrot arasındaki elektrik arkında plazma gazlarının iyonize olmasıyla elde edilir. Soygaz veya soygaz karışımları ile gücü artırmak için az miktarda ilave edilen hidrojen gazı, plazma jeneratörünün ark bölgesine gönderilir ve elektrik arkıyla ısıtılır. Gaz karışımı bu bölgede ısınarak iyonize hale gelir. Böylece yüksek sıcaklık, plazma tabancasının memesinden çıkar. Bu sistemde, tozlar plazma alevine taşıyıcı gaz yardımıyla beslenir. Yüksek sıcaklık etkisiyle eriyen tozlar, kaplama yapılacak yüzeye hızla çarparak katılaşır ve kaplama yapısı elde edilir [2].

2.3.1 Güç Ünitesi

Günümüzde 80, 120 ve 220 KW'lık güç üniteleri kullanılmaktadır. Yüksek güçlü plazma üniteleri kullanılarak sert tozlardan dahi yoğun bir kaplama elde etmek mümkün olur. Sistemde kullanılan güce göre kaplama kalitesi değişkenlik göstermektedir [3].

2.3.2 Toz Besleme Ünitesi

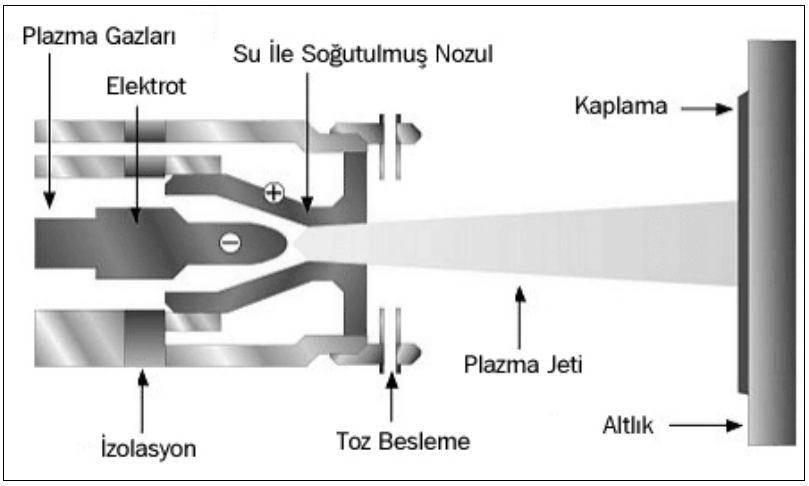
Metaller, intermetalikler, sert metaller, oksit ve oksit esaslı olmayan seramik vb. gibi geniş bir malzeme grubu için plazma püskürtme tekniği ile kaplama yapmak mümkündür. Proseste kullanılan tozlarla ilgili çalışma parametreleri daha ziyade üretici firmalarının tavsiyelerine göre ayarlanmaktadır. Parametreler toz üretim yöntemlerine göre değişkenlik gösterebilir. Toz besleme sisteminin yapısal özelliğinden dolayı farklı tozların homojen olarak karıştırılması ve sisteme beslenmesi mümkün olmaktadır [3].

2.3.3 Gaz Besleme Ünitesi

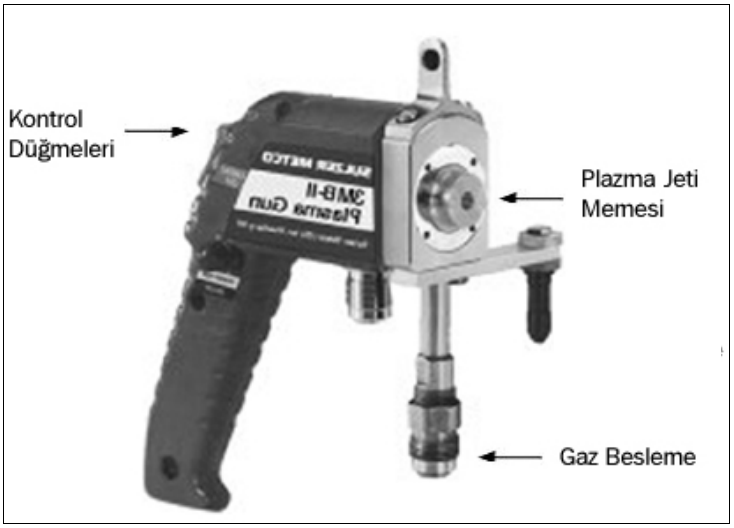
Argon, helyum ve azot plazma püskürtmede en çok kullanılan gazlardır. Plazma gazlarının fonksiyonu; püskürtülen malzemeyi ısıtmak, toz parçacıklarını hızlandırmak ve kaplama yüzeyine taşımaktır. Ayrıca parçacık etrafını sararak, atmosferin kimyasal etkilerinden sıcak yüzeyi koruma görevi de vardır [3].

2.3.4 Püskürtme Tabancası

Püskürtme tabancasının katot, anot ve cidar eksenleri üst üste çakışacak şekilde tasarlanmalıdır. Plazma tabancalarında yapıyı tayin eden diğer bir faktörde yan arktır. Ark üfleçlerinde belirli bir ark mesafesinden sonra, elektrik akımının direnci en küçük olan yolu tercih etmesi nedeniyle, elektrik akımının bir kısmı tabancanın gövdesinden akmaya başlar ve yan ark oluşur. Dolayısıyla esas ark tamamen veya kısmen ortadan kalkmış olur. Bu durum üflecin boyunu sınırlandırır [3]. Plazma püskürtme sisteminde kullanılan tabancanın şeması ve görüntüsü, Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'de verilmiştir.



Şekil 2.4: Plazma püskürtme tabancası ve kaplama sisteminin şematik görünümü [6].



Şekil 2.5: Plazma püskürtme tabancası genel görünümü [7].

2.4 Plazma Püskürtme Gazları

Plazma püskürtme yönteminde ısıtıcı, hızlandırıcı ve taşıyıcı görevleri ile kullanılan dört önemli gaz mevcuttur. Bunlar argon, azot, hidrojen ve helyumdur. Bu gazların temel fiziksel ve kimyasal özellikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de verilmiştir.

2.4.1 Argon

Plazma oluşumu ve ayrıca toz şeklindeki malzemeyi plazma ortamına beslemek için kullanılır. Plazmaya yüksek ısı sağlayan bir gazdır. Karbürler ve yüksek sıcaklık alaşımları argon gazı kullanılarak püskürtme yapılır [2].

2.4.2 Azot

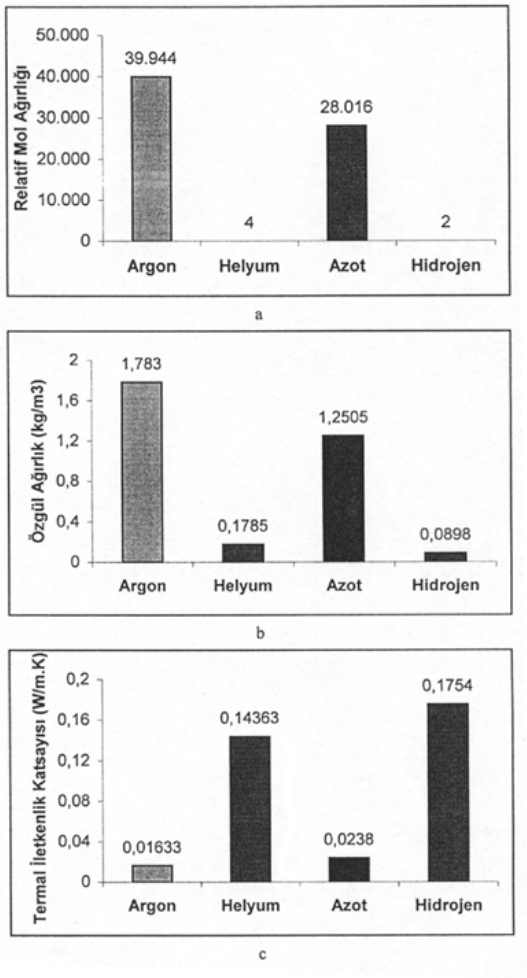
Bu gaz yüksek püskürtme hızları ve yüksek oranda toz malzemeyi gönderme özelliğine sahiptir. Azot gazının entalpisi yüksek olduğundan daha yoğun kaplamaların üretilmesine imkan sağlamaktadır. Azot gazı TiC ve MoS_2 gibi bileşiklerle reaksiyona girdiği için bazı malzemelerde kullanımı sınırlıdır [2].

2.4.3 Hidrojen

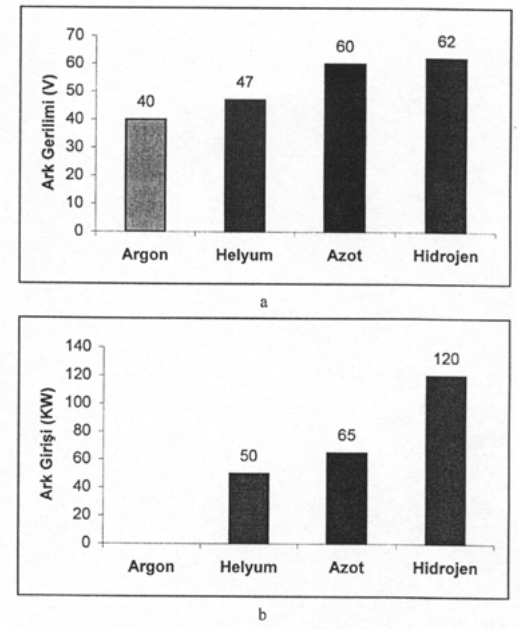
Yardımcı gaz olarak kullanılır, arkın voltajını yükseltir ve plazma sıcaklığının artmasına yardımcı olur. Kullanımda yaygın olarak Ar + H_2 gaz karışımı sisteme beraber enjekte edilir [2].

2.4.4 Helyum

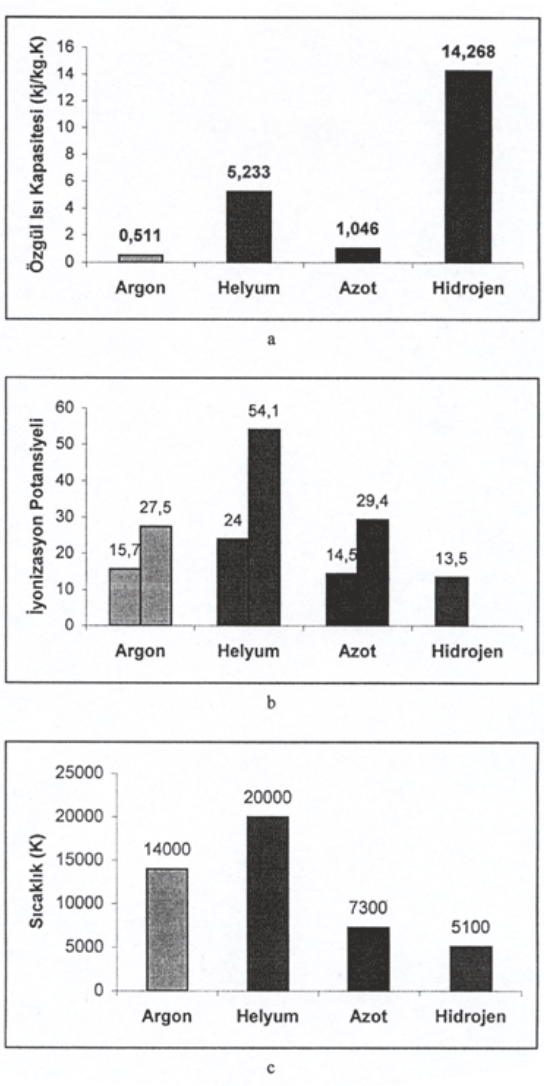
Genellikle yardımcı gaz olarak argonla birlikte kullanılır. Ark voltajını ve plazma sıcaklığını artırmaya yönelik bir gazdır [2].



Şekil 2.6: Plazma gazlarının a) Relatif mol ağırlığı, b) Özgül ağırlık ve c) Termal iletkenlik katsayısı özelliklerinin karşılaştırılması [2].



Şekil 2.7: Plazma gazlarının a) ark gerilimi, b) ark girişi özelliklerinin karşılaştırılması [2].



Şekil 2.8: Plazma gazlarının a) Özgül ısı kapasitesi, b) İyonizasyon potansiyeli ve c) sıcaklık özelliklerinin karşılaştırılması [2].

2.4 Plazma Püskürtme Kaplama Tekniğinin Çeşitleri

Plazma kaplama yöntemleri atmosfer şartlarına, plazma üflecinin dizaynına ve sistemde kullanılan plazma parametrelerine göre üç ana yönteme ayrılmaktadır. Bu yöntemler: "atmosferik plazma sprey", "vakum altında plazma sprey" ve "inert gaz atmosferi altında plazma sprey"'dir. Bu yöntemler genel itibariyle benzer esaslara dayanmaktadır.

Düşük Basınç Altında Plazma Sprey Yöntemi; Bazı kaplama tozlarının havada püskürtülememesi ve kaplama esnasında içine safsızlıkların karışması bu yöntemin kullanılmasıyla engellenir. Bu yöntem ile plazma jeti iyi ayarlandığı taktirde iyi adhezyon ve düşük poroziteye sahip kaplamalar üretilebilmektedir [4]. Kullanılan

kaplama tozlarının, sprey esnasında kaybının önlenmesi açısından bu yöntemin "atmosferik plazma sprey" yöntemine göre tercih edilmesi söz konusudur.

Vakum Altında Plazma Sprey Yöntemi; Bu işlemde kaplama, inert atmosferli bir oda içerisinde düşük basınç altında gerçekleştirilmektedir. Kaplama tozu partikülleri seyreltilmiş bir gaz kabini içerisinden geçerken, daha az soğuduğundan ve yavaşladığından meydana gelen kaplama tabakaları daha yüksek enerjiyle oluşmaktadır. Vakum altında plazma sprey prosesi, tabakaların yüzeye daha iyi yapışmasını, porozite içermemesini, alaşım elementlerinin yanarak kaybolmamasını ve sonuç olarak temiz ve mukavemetli kaplamaların elde edilmesine olanak sağlar [4].

Atmosferik Plazma Sprey Yöntemi (APS); Plazma sprey yöntemi olarak, endüstriyel manada en yaygın kullanılan yöntem "atmosferik plazma sprey" yöntemidir. Bu yöntem, metal ve seramik yüzeylerin kaplanmasında yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemde sprey işlemi havada gerçekleşir ve sprey tozları kaplama üflecinden çıkıp kaplanacak malzemeye ulaşıncaya kadar çevre atmosferi ile yani havadaki oksijen ile reaksiyona girer. Partikül hızının yüksek olması, ergimenin tam olmamasına neden olabilmektedir. Daha uzun ergime zamanı ise, partikül hızlarının düşmesine neden olmaktadır. Partikül hızının yüksek olmasıyla, yüksek bağlanma mukavemetine sahip, yoğun kaplama elde edilmektedir [4].

3. PLAZMA PÜSKÜRTME KAPLAMALARIN ÖZELLİKLERİ

3.1 Giriş

Kaplanmış olan numunelerin, kaplama özellikleri plazma sprey kaplama uygulama parametrelerine göre değişkenlik göstermektedir. Herhangi bir uygulamada kullanılacak kaplamaların mekanik özelliklerinin bilinmesi, malzeme seçimi açısından önemlidir. Kaplamaların temel özellikleri; mikroyapı, porozite içeriği, yapışma mukavemeti, sertlik, iç gerilme ve yüzey pürüzlülüğü olarak sıralanabilir [2-4].

3.2 Kaplama Tabakalarının Oluşumu

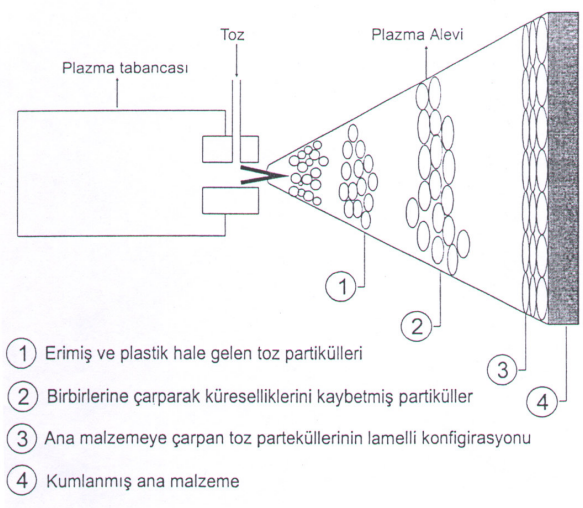
Yüzeyi hazırlanmış parçalar, plazma alevine dik olarak yerleştirilir ve sabitlenirler. Yoğun ve iyi kaliteli kaplamalar elde etmek için, püskürtülen tozların kaplanacak malzemeye dik olarak çarpması gerekmektedir.

Kaplama ve altlık malzemeleri arasındaki termal genleşme farkını azaltarak, kaplama tabakasının ana malzemeye daha iyi yapışmasını sağlamak için özellikle seramik kaplamalarda altlık malzeme üzerine ara tabaka uygulaması yapılır. Ara tabakadan beklenen performansın alınması için, kaplama kalınlığının 100 mikronu aşmaması gereklidir.

Püskürtme işlemi esnasında plazma tabancası elle veya otomatik olarak kontrol edilir. El Kontrollü tabancayla yapılan kaplama işleminde kaplama kalitesini, doğrudan tabancayı kullanan operatörün el becerisi belirler ayrıca kaplama malzemesinin püskürtme parametrelerinin de kaplama tabakalarının özelliklerinin belirlenmesinde büyük ölçüde etkisi vardır [4].

Plazma ışınının yüksek termal ve kinetik enerjisi, beslenen toz partiküllerinin ergitilmesi ve hızlandırılmasını sağlamaktadır. Plazma ile püskürtülen katmanların özelliklerine etki eden çeşitli faktörler vardır. Tozların şekli ve granülaritesi, plazma torcuna tozların ulaştırma metodu ve belirli hızlardaki partiküllerin uçuş yörüngesi kaplamanın fiziksel ve kimyasal özelliklerine etki etmektedir. Plazma ışını ve etrafını

saran atmosfer ile ergimiş malzemelerin etkileşimi plazma ışınındaki partiküle etki ederek, partikülün fiziksel ve kimyasal dönüşümüne neden olmaktadır. Plazmada partiküllerin uçması esnasında gaz ile etkileşmektedir. Ergime sıcaklığında bütün malzemeler yüksek kimyasal aktivite göstermektedir. Gazlarla püskürtülen partiküllerin etkileşimlerin çeşitli mekanizmaların gaz adsorbsiyonu, oksit katmanların oluşumu ve kimyasal etkileşim, partiküllerin yüzeye bağlanması, ergimiş partiküllerde gaz çözünmesi ve difüzyon proseslerinden bahsedilebilir. Böylece ergimiş partiküllerin altlığa çarptığında mekaniksel, kimyasal ve termal şartları püskürtülen katmanların tüm karakter ve özelliklerine etki etmektedir. Plazma alevindeki erimiş partiküller ana malzeme yüzeyine çarptığı zaman, kinetik enerjileri ısıl ve deformasyon enerjisine dönüşür. Partiküller ana malzemeyle temas ettiklerinde, ısılarını yüzeye aktarıp hızla soğur ve katılaşırlar. Partiküllerin o andaki davranışları; sıcaklıklarına, hızlarına ve soğuma davranışlarına bağlıdır. Plazma alevindeki hareket esnasında yüzey gerilimi nedeniyle küresel şekle sahip oldukları düşünülen erimiş partiküller, ana malzeme yüzeyine çarptıklarında ısıl ve kinetik enerjilerini kaybederek deforme olurlar ve sonra 5-15 $x10^{-3}$mm kalınlığında lameller şeklinde katılaşırlar. Bu durum Şekil 3.12'de şematik olarak gösterilmiştir. Deformasyon miktarı ve dolayısıyla lamellerin şekli; erimiş partiküllerin vizkozitesi ve ıslatılabilirliği, toz granülitesi ve ana malzeme yüzeyinin karakteri gibi birçok faktöre bağlıdır [4].



Şekil 3.1: Plazma işleminde toz partiküllerin deformasyonu ve püskürtülen yüzeye bağlanması [2].

3.3 Plazma Püskürtme Kaplamaların Özellikleri

Herhangi bir uygulamada kullanılacak kaplamaların mekanik özelliklerinin ve yük altında gösterdiği davranışların bilinmesi malzeme seçimi kullanım açısından önemlidir. Kaplamaların temel özellikleri; mikroyapı, gözenek, yapışma mukavemeti, iç gerilmeler, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü olarak sıralanabilir [4].

3.3.1 Mikroyapı

Plazma ışınında ergitilen partiküller yüzey gerilimlerinin sonucu olarak küresel şekiller elde edilir. Püskürtülen malzemelerin ergimiş partikülleri, yüzeye çarptıktan sonra kaplamanın oluşması esnasında yassı ve lamelli yapılar oluşturmaktadır. Kontrolsüz atmosferde yapılan kaplamalar ise inklüzyonlar ve gözenek içerir [4].

3.3.2 Gözenek ve yoğunluk

Gözenek, ısıl püskürtme yöntemlerinin karakteristiğidir. Püskürtülmüş malzemelerin oluşturduğu kaplamalarda, gözenekler ve oksitler oluşabilir. Yüksek gözenekli kaplamalar, uzun püskürtme mesafesi ile ve iri taneli tozlar kullanılarak meydana gelir. Plazma püskürtme kaplamalarında gözenek oluşumu:

- Kullanılan gazın yapısına ve püskürtme tabancasının gücüne,
- Kaplama işleminde kullanılan püskürtme parametrelerine ve
- Kullanılan kaplama tozunun tane boyutuna bağlıdır.

Kaplama tabakaların yoğunluğu teorik yoğunluktan düşüktür. Oksitler ve gözenekler kaplama hacmini artırmaktadır. Malzemenin yapışma mukavemeti, sertlik ve korozyon gibi özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Bunun yanında yüksek gözenek miktarı, ısıl izolasyon ve filtrasyon gibi uygulamalar için arzu edilen bir durumdur [2].

3.3.3 Yapışma mukavemeti

Yapışma mukavemeti; taban malzemesinden bir birim kaplama alanının ayrılması veya koparılması için gerekli olan kuvveti ifade etmektedir. Plazma püskürtme kaplamaların altlık üzerine yapışması, kumlanmış yüzeylerde mekaniksel olarak (adhezyon) gerçekleşir. Metalik yüzeylerde iyi bir yapışma, kaplanacak yüzeyin temizliği ve pürüzlülük derecesiyle doğru orantılıdır. Kaplama tabakalarının yapışma

mukavemetini [4]:

- Kaplama malzemesine,
- Kaplama kalınlığına,
- Esas malzemeye,
- Kaplama öncesi yapılan yüzey hazırlama işlemine,
- Kaplamada kullanılan proses parametreleri (plazma sisteminin gücü, püskürtme açısı, plazma akımı ve gazları, püskürtme mesafesi) ve
- Kaplama malzemesi ve esas metal arasındaki ısıl genleşme uyumuna bağlıdır.

3.3.4 İç gerilmeler

Kaplama esnasında iç gerilmeler, üretim boyunca hızlı katılaşma veya kaplama–altlık arasındaki termal genleşme katsayısındaki uyumsuzluktan dolayı oluşur. Püskürtülen malzeme ile altlık malzemesi arsındaki sıcaklık farkı, ergimiş tozun hızlı katılaşmasına ve oluşan tabakada iç gerilmelere sebebiyet verir. Bu durum altlık malzemesinin bir dereceye kadar ısıtılmasıyla giderilebilir. Ayrıca ara tabaka uygulaması veya çok katmanlı kaplamalar ile de termal genleşme katsayılarındaki fark giderilebilir [2].

3.3.5 Sertlik

Kaplama kalınlığının artması, kalınlık yönünde sertliği düşürmektedir. Ayrıca sertlik, kaplama malzemesinin cinsine, kaplama yapısındaki gözenek miktarı ve tabakanın heterojen yapısına bağlıdır [4].

3.3.6 Yüzey pürüzlülüğü

Kaplama yüzeylerinde korozyon etkisine en açık noktalar bölgesel farklılıklardır. Yüzey pürüzlülüğünün artması kaplamanın açık gözenekliliğini arttırmaktadır. Kaplama üzerindeki bölgesel farklılıklar çeşitli zımparalama kademeleriyle giderilerek korozyona dirençli yüzeyler elde edilir [4].

3.6 Plazma Püskürtme Prosesinin Uygulama Alanları

Sistemin yüksek proses sıcaklığı, ergime noktası yüksek malzemelerle çalışma imkanı sağlamaktadır. Toz formunda ve belirli tane boyutunda üretilen tüm malzemeler bu proseste başarıyla kullanılmaktadır. Plazma püskürtme yönteminin uygulandığı çeşitli endüstri kolları, kaplama işleminin uygulandığı malzemeler ve kaplama türleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir [2,3].

Tablo 3.1: Plazma püskürtme tekniği uygulama alanları [2].

Endüstri Alanı	**Amaç**	**Uygulanan Malzeme**	**Kaplama Türü**
Otomotiv	Aşınma, termal bariyer korozyon direnci,	Valfler,	Al_2O_3+$TiO_{2+}Y_2O_3$
Kimya	Aşınma ve korozyon direnci	Şaftlar,tüpler, brülör, bıçaklar ve soğutma sistemleri	MoCrBSi, Al_2O_3+TiO_2, $ZrSiO_4$, Cr_2C_3+NiCr
Hidrolik Makinaları	Aşınma, erozyon, kavitasyon ve korozyon direnci	Pompalar, şaftlar	Al_2O_3+TiO_2, $ZrSiO_4$, Cr_2O_3,
Cam	Termal bariyer, abrasif ve korozyon direnci	Cam presleme mandrelleri, cam yapıcı çubuklar	Al_2O_3+TiO_2, $ZrSiO_4$, ZrO_2
Uçak ve Uzay	Sıcak gaz korozyon direnci	Uçak gaz türbinlerinin yanma odaları, pervane statörleri, türbin panelleri, pervane platformları	Termal Bariyer esaslı kaplamalar
Nükleer Teknoloji	Termal bariyer ve aşınma direnci	Genleşme ölçer, termokupul, güç jeneratörü, yakıt elemanları	Al_2O_3, Al_2O_3+MgO, ZrO_2, Cr_2C_3+NiCr
Kağıt Sanayi	Aşınma	Kurutma silindirleri	Mo- NiCr
Termik Elektrik Santralleri	Sıcak gaz korozyon direnci	Gaz türbin kanatları	MCrAlY

4. SERAMİKLERİN SU İÇİNDEKİ AŞINMA DAVRANIŞLARI

4.1 Giriş

Seramiklerin sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek sertlik, kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklık dayanımları onlara benzersiz tribolojik özellikler kazandırmaktadır. Seramikler bu özellikleri sayesinde mil yatakları, silindir çeperleri, segmanlar ve su pompaları gibi mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır [8-10].

Seramiklerin, farklı koşullarda aşınma davranışları bir çok araştırmacı tarafından incelenmiş ve kuru ortam koşullarında sürtünme katsayısının 0.3'ün üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Buda bize seramiklerin tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi açısından uygun yağlayıcıların kullanımının gerekli olduğunu göstermektedir [8].

Yağlayıcılar hareketli parçaların kayma temas noktalarındaki yüksek sürtünme ile oluşan aşınmanın önlenmesinde rol oynar. Yağlamanın amacı parçaların temas noktasında ince yağlayıcı film oluşturarak hareketli yüzeyleri birbirinden ayırmaktır ve bu durumda parçaların maruz kaldığı yük ince film tarafından taşınır [11].

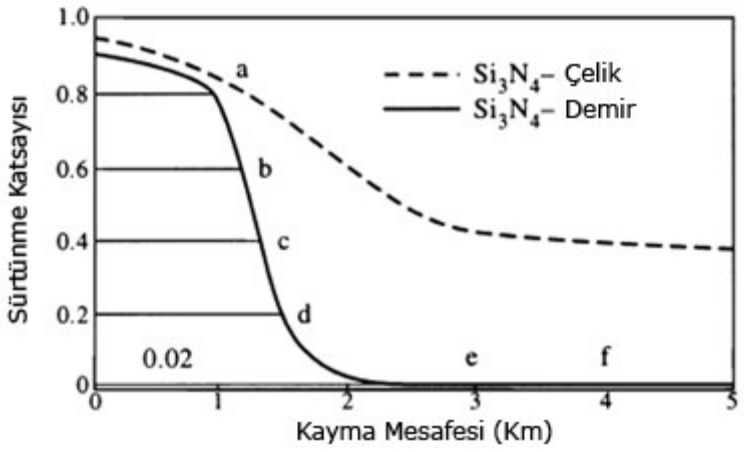
Hız kazanan çalışmalarla birlikte, su yağlayıcı olarak kullanılmış ve sulu ortamda Si_3N_4-Si_3N_4 çiftlerinin ≤ 0.002 gibi düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçla birlikte Si_3N_4, SiC gibi seramiklere olan ilgi artmıştır [9]. Su içerisinde çalışan seramik parçaların, gösterdikleri tribolojik özellikler hakkında yapılan çalışmalarda seramiklerin çeşitli tribokimyasal reaksiyonlara maruz kaldığı belirlenmiştir ve Si_3N_4 ile SiC'ün temas yüzeylerinde, su içerisinde tribokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan ince film tabakası umut verici sonuçlar ortaya koymuştur [8,10-11].

Unutulmamalıdır ki kayganlaştırıcı sistemlerden sızan kimyasal yağlayıcılar çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Çevre kirliliği ve doğal kaynakların kısıtlılığı sorunları seramiklerin, kimyasal yağlayıcılar ile yağlanması yerine su kullanılarak yağlanması ile aşılabilir [9,11]. Seramik çifti mekanik parçalar, su içinde abrasif aşınmaya karşı gösterdikleri yüksek dirençten dolayı, mil yatağı ve su pompalarında ve daha bir çok mühendislik uygulamasında büyük potansiyele sahiptir [9].

4.2 Si_3N_4 ve SiC Seramiklerin Su İçindeki Aşınma Davranışı

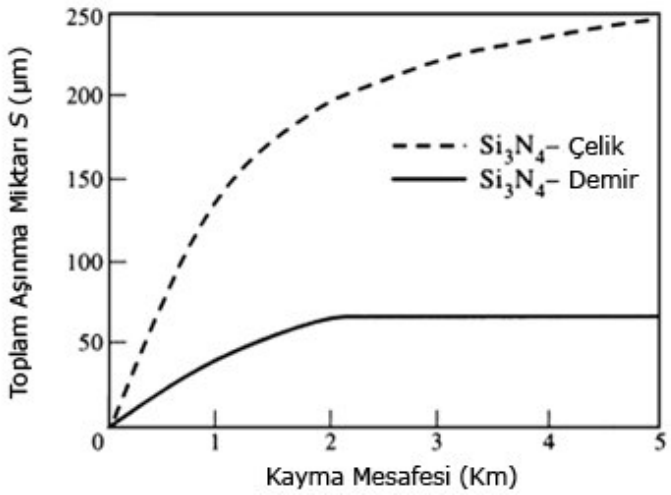
Si_3N_4 seramikler, aşınma yüzeylerinde su ile girdikleri reaksiyon sonucu ince bir film oluşturmaktadır ve bu film seramiklere düşük sürtünme katsayısı – düşük aşınma miktarı gibi özellikler katmaktadır. Bu özellikler Si_3N_4 seramiklerin mühendislik uygulamalarında ilgi odağı olmalarına sebep olmuştur [12,13].

Film oluşumu, yüzeylerin oldukça pürüzsüz olmasını sağlar ve aşınma mekanizmasını hidrodinamik yağlama haline dönüştürür [14]. Su ile yağlanan sialon-paslanmaz çelik çiftinin sürtünme katsayısının yaklaşık 0.6 olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal yağlayıcının kullanılması durumunda bile Si_3N_4-Stelit kayma çiftinin sürtünme katsayısı 0.1 mertebesindedir. Si_3N_4-dökme demir çiftinin aşınma davranışı üzerine birçok çalışma yayınlanmıştır. Bu çalışmaların geneli atmosfer ortamında yapılmış ve birçok bulgu elde edilmiştir. Fakat buna rağmen Si_3N_4- dökme demir çiftlerinin su ile yağlandığı ve temas yüzeylerinde tribokimyasal reaksiyonlar sonucu bir tribofilmin oluşturulduğu aşınma sistemlerine ait çalışma oldukça azdır. Önceki araştırmalarda, Si_3N_4- dökme demir çiftinin sulu ortamda sürtünme katsayısının, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi artan sürtünme mesafesi ile 0.02 değerine ulaştığı tespit edilmiştir [12].



Şekil 4.1: Saf su ile yağlanan Si_3N_4-Metal kayma çifti sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı değişimi [12].

Sürtünme katsayısının düşük bir değerde sabit kalmasıyla, kayma parçalarının toplam aşınma miktarı da sabitlenmektedir (Şekil 4.2). Bu durum sürtünme katsayısının 0.02'ye ulaştıktan sonra Si_3N_4-Beyaz Demir çiftinin sulu ortamda neredeyse aşınmadığını göstermektedir [12].

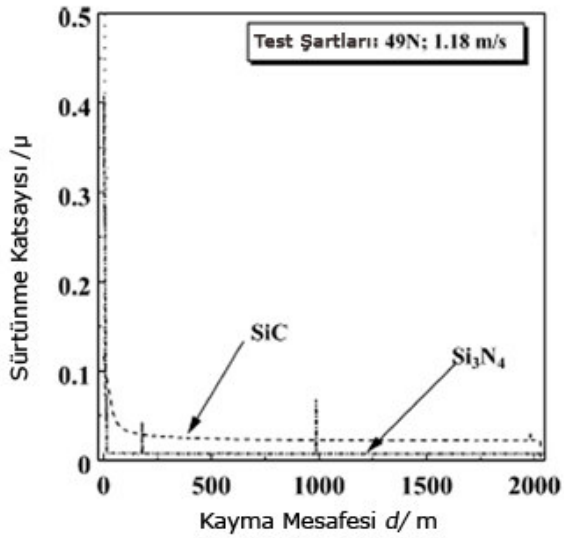


Şekil 4.2: Saf su ile yağlanan Si_3N_4-Metal kayma çifti toplam aşınma miktarının kayma mesafesine bağlı değişimi [12].

Bu mükemmel tribolojik özellikler seramik-metal kayma çiftleri için, yeni bulgular olup, mühendislik uygulamaları için oldukça dikkat çekmiştir. Numune yüzeylerinin aşındırılmasıyla elde edilen bu mükemmel karakteristik özellik, aşınma yüzeylerinde oluşan, yaklaşık 0.4µ kalınlığındaki bir tribofilm sayesinde ortaya çıkmaktadır [13].

SiC seramikler su içerisinde Si_3N_4 seramiklere benzer davranış göstermektedirler. H. Mindivan ve arkadaşları, SiC partikül takviyeli alüminyum metal matrisli kompozitlerin kuru ve saf su ortamında tribolojik davranışlarını araştırmışlardır. Bu çalışma kapsamında, basınçlı döküm yöntemiyle 15mm kalınlığında 50mm çapında, %50 SiC içeren numuneler üretilmiştir. Daha sonra numuneler salınım hareketli (reciprocating) aşınma test cihazında, karşıt malzeme Al_2O_3 bilye yardımıyla aşındırılmışlardır. Aşınma deneyi farklı yükler için, kuru ve saf su ortamlarında yapılmıştır. Çalışmada test yüküne bağlı olarak kuru ortamda sürtünme katsayısının 0.4–1.8 aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Saf su ortamında ise sürtünme katsayısının önce 1.0 değerine ulaştığı ve daha sonra düşerek 0.4 civarında kararlı hale geçtiğini belirtilmektedir [11]. Aynı bulgu D. Amutha Rani ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da belirtilmiştir. Si_3N_4 ve SiC seramiklerin saf su içerisinde sürtünme katsayıları önce belli bir kayma mesafesine kadar hızlıca artmakta ve daha sonra hızlı bir düşüşe geçerek daha düşük bir değerde kararlı hale geçmektedir [10]. Sürtünme katsayısının azalması, saf su içerisindeki aşınma deneyi esnasında yüke ve kayma mesafesine bağlı olarak, aşınma yüzeyinde oluşan ince tribokimyasal filme (Bölüm 4.3) dayandırılmaktadır [10-11].

D. Amutha Rani ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, aşınma malzemesi olarak sinterlenmiş Si_3N_4 ve SiC seramikleri, karşıt malzeme olarakta yine aynı malzemeleri kullanmış, Si_3N_4-Si_3N_4 ve SiC-SiC çifti aşınma sistemleri oluşturmuşlardır. Aşınma deneylerini farklı yüklerde ve farklı kayma hızlarında, su içerisinde gerçekleştirmiş ve her iki seramiğin tribolojik davranışlarını karşılaştırmalı olarak ortaya koymuşlardır. Şekil 4.3'te görülmektedir ki, deneyin başlangıç aşamasında, ilk 100m içerisinde her iki seramiğinde sürtünme katsayıları yükselmektedir. Başlangıç aşamasından sonra sürtünme katsayısı, Si_3N_4 için keskince fakat SiC için farklı bir davranış olarak adım adım düşmektedir ve daha sonrasında düşük bir değerde sabit kalmaktadır. SiC'ün sürtünme katsayısı 0.16 değerinde başlamış sonrasında adım adım azalmış ve 0.02 değerinde sabitlenmiştir. Si_3N_4'de ise sürtünme katsayısı 0.35'ten 0.009'a ani bir düşüş göstermiştir ve kararlı hale geçtikten sonra sürtünme katsayısında dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Bu durumun tribokimyasal filmin zarar görmesi ve tekrar oluşumunda kaynaklandığı rapor edilmektedir [10].

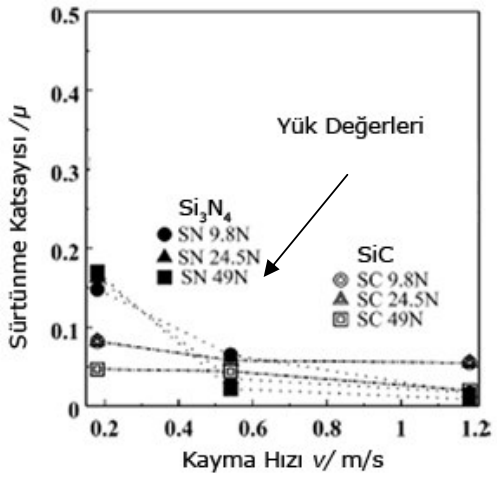


Şekil 4.3: Su içinde yapılan aşınma deneylerinde sürtünme katsayısının kayma mesafesine bağlı değişimi [10].

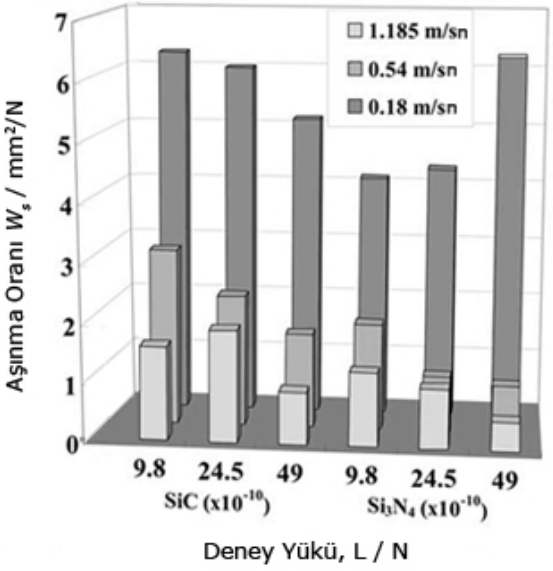
Çalışmada ortalama sürtünme katsayıları (μ_{av}), 0 ila 2000 metre arasındaki sürtünme katsayısı grafiğinin ortalama değeri alınarak belirlenmiştir. Farklı yükler ve kayma hızları için μ_{av} değerleri grafiği Şekil 4.4'te görülmektedir. İlk olarak kayma hızı 0.18'den 0.54 m/sn'ye arttırıldığında Si_3N_4'ün ortalama sürtünme katsayısı değerinde 0.18'den 0.05'e ani bir düşüş görülmektedir. Fakat bu durum SiC seramiklerde gözlenmemektedir. SiC'ün değişen kayma hızıyla birlikte, ortalama sürtünme katsayısı azalmakta ancak Si_3N_4 gibi kayda değer bir değişim göstermemektedir.

Grafikte artan yük ve kayma hızı ile birlikte Si_3N_4'ün SiC'e göre daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu, fakat yük miktarının sürtünme katsayısına ciddi bir etkisi olmadığı açık bir şekilde görülmektedir [10].

Düşük kayma hızında (0.18m/sn) SiC'ün aşınma oranı, deney yükünün artmasıyla azalmakta, Si_3N_4'de ise aşınma oranı artmaktadır (Şekil 4.5). Yüksek kayma hızında (1.185m/sn) her iki malzemede de yükün artmasıyla aşınma oranında düşüş olduğu görülmektedir. Ayrıca kayma hızının arttırılması (0.18m/sn'den, 1.185m/sn'ye), aşınma oranının kayda değer miktarda azalmasını sağlamıştır [10].



Şekil 4.4: Su içinde yapılan aşınma deneylerinde ortalama sürtünme katsayısının (μ_{av}) kayma hızına bağlı değişimi [10].



Şekil 4.5: Su içinde yapılan aşınma deneylerinde aşınma oranının, kayma hızına ve deney yüküne bağlı değişimi [10].

4.3 Su İçinde Tribokimyasal Film Oluşumu

SiC seramikler yüksek sertliğinden dolayı, Si_3N_4'e göre daha yüksek abrasiv aşınma direnci göstermektedir ve aşınma çiftlerinde SiC'ün temas yüzeyindeki basınç Si_3N_4'e göre daha düşüktür. Ming Cohen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, su içerisindeki aşınma deneylerinde Si_3N_4'ün deney süresince tribokimyasal aşınmaya maruz kaldığı, SiC'ün aşınma mekanizmasının ise abrasiv aşınmadan tribokimyasal aşınmaya dönüştüğü tespit edilmiştir. Bu durumun deney süresince her iki seramiğin su içindeki kayma koşullarında farklı kimyasal tepkimeler vermesi ve seramiklerin enerji aralıklarındaki farktan kaynaklandığı rapor edilmiştir. Si_3N_4 seramikler 5.0eV, SiC seramikler ise 2.8eV enerji aralığına sahiptir ve su ile yavaşça tepkimeye girerler. Enerji aralığı 8.0eV olan H_2O ile Si_3N_4'ün reaksiyon oranı, SiC seramiklere göre daha fazladır ve bu durum enerji aralığı farkının (3.0eV), SiC'e göre Si_3N_4 ile H_2O arasında daha az olmasından kaynaklanır [9].

Bilinmektedir ki; Si_3N_4 su içerisinde çözünebilmekte ve su ile reaksiyona girmektedir. Fakat bu reaksiyon 400^oK'in üzerinde sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Si_3N_4'ün kayma esnasında temas yüzeyindeki sıcaklık 400^oK'i geçebilir ve reaksiyon gerçekleşir. Reaksiyon ürünlerinin kayma temas yüzeyinde birikmesi ile birlikte yüzey, yağlamayı sağlayan ve sürtünme katsayısını düşüren ince film ($Si(OH)_4$) tabakayla kaplanır [13].

J.F.Li ve arkadaşları, SiC seramiklerin kayma esnasında tanelerarası kırılmaya maruz kaldığını ve tane sınırları boyunca çatlaklar oluştuğunu bildirmişlerdir. Bu durumun yüksek kırılma geriliminden kaynaklandığını ve bu bölgelerde seramiğin su ile reaksiyona girdigi rapor edilmiştir. Ayrıca temas yüzeyinde biriken reaksiyon ürünlerinin birkaç nanometre kalınlığında ince bir film oluşturduğunu ve yüzeyin pürüzlülüğünü azalttığını belirtmişlerdir [8].

Literatürde, Si_3N_4 ve SiC seramikler için su içerisindeki tribokimyasal reaksiyonlar

$$\left.\begin{array}{l} Si_3N_4 + 6H_2O \rightarrow 3SiO_2 + 4NH_3 \\ SiO_2 + 2H_2O \rightarrow \mathbf{Si(OH)_4} \end{array}\right\} Si_3N_4 \qquad \textbf{(4.1)}$$

$$\left.\begin{array}{l} 2SiC + 3O_2 \rightarrow 2SiO_2 + 2CO \\ SiO_2 + 2H_2O \rightarrow \mathbf{Si(OH)_4} \end{array}\right\} SiC \qquad \textbf{(4.2)}$$

Şeklinde ifade edilmektedir [15,16].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Çalışmanın Tanımlanması Ve Amacı

Bu çalışma kapsamında 2014-T4 alüminyum alaşımının yüzeyinde plazma püskürtme tekniği ile Al-12Si matrisli SiC takviyeli kompozit tabaka oluşturulmuştur. Bu amaça yönelik olarak öncelikle kaplama tozları (Al-12Si ve SiC) farklı ortamlarda ve parametrelerle karıştırılmıştır. Elde edilen tozlar N kodu ile kodlanmıştır. Hazırlanan kaplama tozları atmosferik plazma püskürtme (APS) tekniği kullanılarak 2014-T4 kalite alüminyum parça üzerine püskürtülmüş ve ND kodu ile kodlanan 10 farklı kaplama numunesi elde edilmiştir. Tüm numunelerin karakterizasyonu yapıldıktan sonra istenilen parametrelere erişen ND4-8 ve ND10 numuneleri kuru ve sıvı ortamda aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Aşınma deneyi sonrası aşınma davranışı ve aşınma izleri incelenerek tüm sonuçlar ortaya konmuştur.

Çalışmada, öncelikle kaplama tozlarını farklı ortam ve parametrelerle karıştırarak, 2014-T4 alüminyum alaşımı kaplama tabakasındaki SiC birikiminin arttırılması hedeflenmiştir. Aşınma deneylerinde kaplamaların, karbür miktarına bağlı olarak kuru ve saf su içinde aşınma davranışları incelenerek, saf su içindeki aşınma davranışının ortaya konulması amaçlanmıştır.

5.2 Plazma Püskürtme Kaplama Uygulaması

Bu çalışma kapsamında, altlık malzeme (2014-T4 alüminyum alaşımı), METCO INC. tarafından üretilen 40KW'lık atmosferik plazma sistemi ve METCO^{TM} 3MB tipi plazma püskürtme tabancası kullanılarak kaplanmıştır. Uygulama parametreleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Kaplama uygulamasında kullanılan püskürtme parametreleri.

Primer Gaz Akış Hızı(Ar l/dk.)	100
Sekonder Gaz Akış Hızı(H_2 l/dk.)	15
Taşıyıcı Gaz Akış Hızı(Ar l/dk.)	37
Püskürtme Mesafesi(mm)	110-120
Akım(A)	500
Voltaj(V)	65

40mm çapındaki 2014-T4 kalite alüminyum çubuk, tornada 40mm çapında 7mm yüksekliğinde diskler haline getirilerek altlık malzemeler elde edilmiştir. Kaplama işlemi öncesi altlık malzemeler, kaplama tozlarının mekanik bağlanmayı sağlayacağı pürüzlü ve temiz yüzeyin eldesi için Tablo 5.2'de verilen parametrelerle kumlama işlemine tabi tutulmuştur [4].

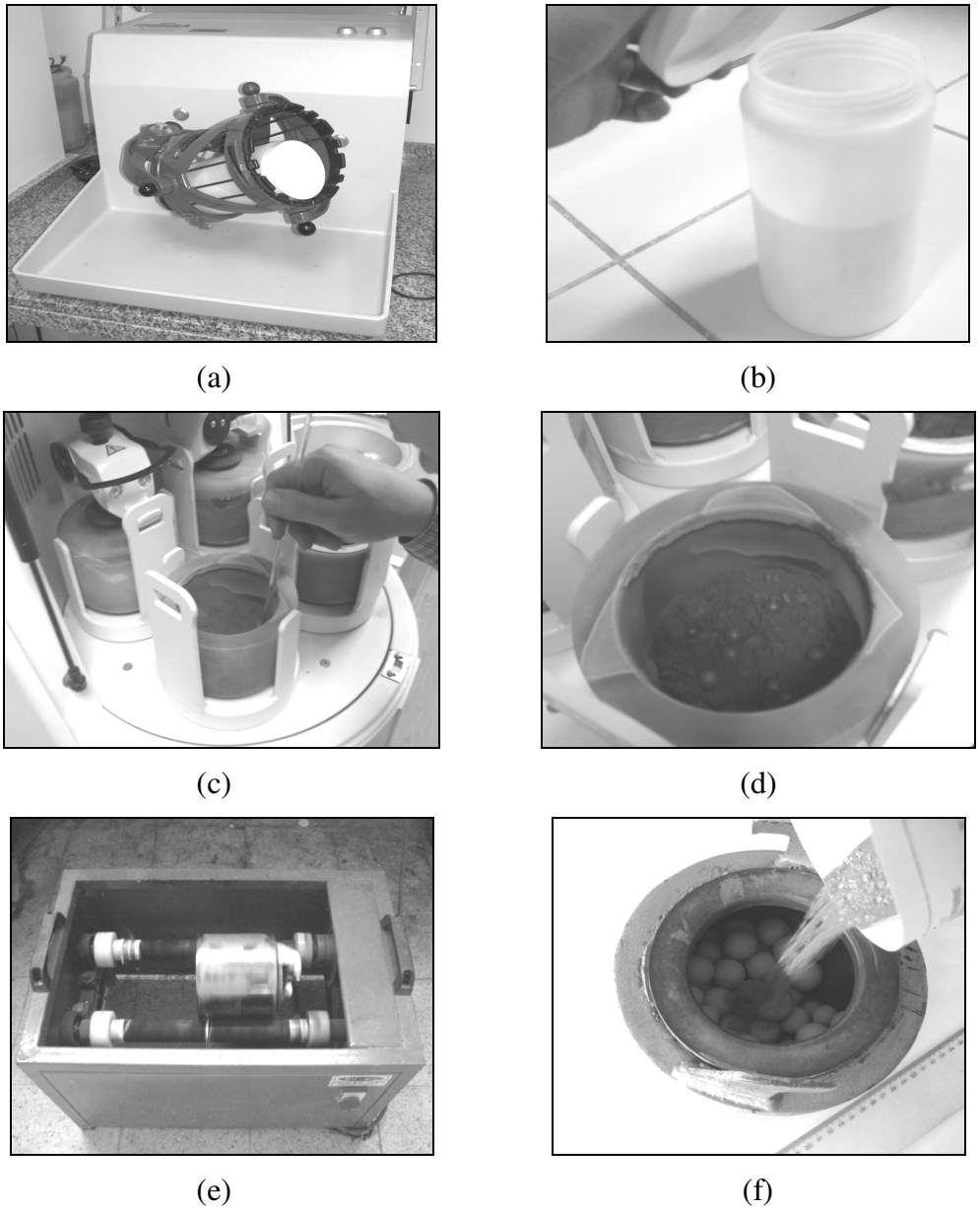
Tablo 5.2: Kumlama işlemi parametreleri.

Püskürtülen Toz	Alümina(Al_2O_3)
Basınç(Bar)	5-10
Tane Boyutu(Mesh)	30
Kumlama Süresi(Sn)	60-120

Kaplama tozları METCO INC. tarafından üretilen Al-12Si (52C-NS^{TM}) tozu ve piyasadan elde edilen SiC tozudur. Toz boyutları Al-12Si için -90, +45µm ve SiC için -37µm'dir. Al-12Si tozunun morfolojisi küresel SiC tozunun ise keskin kenarlı ve köşelidir. Kaplama tozları farklı oranlarda, Şekil 5.1'de görülen planeter karıştırıcı, rotasyonel karıştırıcı ve geleneksel karıştırıcıda karıştırılmış, karışım esnasında oluşabilecek kimyasal reaksiyonları önlemek amacıyla ortama reaksiyon önleyici bileşenler ilave edilmiştir. Karıştırma işlemleri sonrası elde edilen 10 farklı toz numunesi için karışım oranları ve ortam koşulları Tablo 5.3'te verilmiştir.

N1 ve N2 toz karışımları kapalı bir kap içerisinde serbest olarak 5 dakika süreyle çalkalanmıştır. Her iki toz karışımı aynı bileşim ve karıştırma koşularına sahipdir fakat kaplama uygulaması esnasında farklı adımlarla yüzeye püskürtülmüşlerdir. N3 toz karışımına, karıştırma esnasında ortaya çıkan ısı ile birlikte oluşabilecek kimyasal reaksiyonları önlemek amacıyla etil alkol ilave edilmiştir [8]. Planeter karıştırıcıda, kapalı kap içerisinde, en yüksek hız olan 400rpm'de 120 dakika süreyle serbest olarak karıştırılmıştır. N4 ve N5 toz karışımları, planeter karıştırıcıda aynı koşullarda farklı iki kapalı kapta hazırlanmıştır. Kapalı kap içerisine etil alkol ve mekanik alaşımlama sağlamak amacıyla ortalama çapı 10mm olan SiO_2 esaslı toplar ilave edilerek 120 dakika süre ile karıştırılmıştır [9,10]. N6 toz karışımına sertlik artışı sağlamak amacıyla 2.4gr yapay elmas (UDDP) ilave edilmiş ve 120 dakika boyunca 24gr top ile karıştırılmıştır. N7 toz karışımındaki SiC partikülleri, yüzeylerinde oksit tabakası sağlamak amacıyla karışım öncesi 1000^0C'de 120 dakika bekletilmiştir. Karışıma 2gr grafit eklenmiştir ve 1200 dakika boyunca rotasyonel

karıştırıcıda serbest karıştırılması sağlanmıştır [11]. N8 ve N9 karışımları benzer karıştırma koşullarına sahiptir. N8 karışımı serbest olarak, N9 karışımı SiO_2 esaslı toplar yardımı ile 240 dakika süre ile pleneter karıştırıcıda karıştırılmıştır. N10 toz karışımı %65 SiC içermektedir, kimyasal reaksiyonları önlemek amacıyla karışıma 3.75gr Stearik Asit ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi geleneksel karıştırıcıda ortalama boyutu 15mm, toplam ağırlığı 1542gr olan Al_2O_3 esaslı toplar yardımıyla 360 dakika süre ile yapılmıştır [12-14].



Şekil 5.1: Karıştırma ortamları ve karıştırma kapları genel görünümü. (a) Rotasyonel karıştırıcı, (b) Rotasyonel karıştırıcı kabı, (c) Planeter karıştırıcı, (d) Planeter karıştırıcı kabı (e) Geleneksel karıştırıcı, (f) Geleneksel karıştırıcı kabı.

Tablo 5.3: Toz numunesi karışım oranları ve ortam koşulları.

Toz Kodu	Toz Bileşimi (%Bileşen)			Toplam Ağırlık(gr)	Yardımcı Bileşen	Karıştırma Ortamı	Karıştırıcı Top(gr)	Hız (rpm)	Süre (dk)
	Al-12Si	SiC	Diğer						
N1	50	50	-	80	-	Serbest kap	-	-	5
N2	50	50	-	80	-	Serbest kap	-	-	5
N3	50	50	-	80	Etil Alkol (10ml)	Planeter	-	400	120
N4	50	50	-	80	Etil Alkol (10ml)	Planeter	154 (SiO_2)	400	120
N5	50	50	-	80	Etil Alkol (10ml)	Planeter	154 (SiO_2)	400	120
N6	50	47	3 (UDDP)	80	Etil Alkol (10ml)	Planeter	24 (SiO_2)	400	120
N7	30	68	2 (Grafit)	100	-	Rotasyonel	-	-	1200
N8	30	70	-	80	Etil Alkol (10ml)	Planeter	-	400	240
N9	30	70	-	80	Etil Alkol (10ml)	Planeter	154 (SiO_2)	400	240
N10	35	65	-	250	Stearik Asit (3.75gr)	Geleneksel	1542 (Al_2O_3)	90	360

5.3 Kaplamaların Karakterizasyonları

Kaplamaların karakterizasyonları; optik mikroskop incelemeleri, kantitatif faz analizi, mikrosertlik ölçümleri, X-ışınları difraksiyon (XRD) analizleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları ile yapılmıştır.

Mikroyapı incelemeleri için LEICA^{TM} marka ve DM6000-M model optik mikroskop (OM) kullanılmıştır. OM çalışması öncesi 10 farklı kaplama numunesi kesilmiş, zımparalanmış ve parlatılmıştır. Kaplanmış numunelerde kesme işlemi kaplamadan ana malzemeye doğru olmak üzere, laboratuar tipi bir cihazda yapılmıştır. Kesme işlem yönünün kaplamadan ana malzemeye doğru olmasının nedeni, kaplama çekme gerilmelerinin oluşumunu ve tabakada çatlak oluşumunu engellemektir. Kesilmiş

numuneler soğuk bakalite alma yöntemi ile kalıplanmış ve daha sonra zımparalama kademelerine geçilmiştir. Zımparalama işlemi, yarı otomatik PRESI^{TM} marka Mecapol P220S ve P230 model cihazlarda sırasıyla 180-240-320-400 ve 600 gridlik SiC zımparalar kullanılarak yapılmıştır. Zımparalama sonrası parlatma işlemi ise iki kademede gerçekleştirilmiş, ilk kademede STRUERS^{TM} marka 6µ'luk elmas solüsyon ve MD/Dac parlatma diski ikinci kademede 1µ'luk elmas solüsyon ve MD/Nap parlatma diski kullanılmıştır. Parlatılmış numunelerde herhangi bir dağlama işlemi uygulanmamıştır. Mikroyapı incelemesi öncesi numuneler metalografik işlemler uygulanarak yüzey ve arayüzeyleri incelemeye hazır hale getirilmiştir. Metalografik incelemede; genel kaplama mikroyapısı, SiC dağılımı, porozite ve kaplama kalınlığı üzerinde durulmuştur.

Kantitatif faz analizi, METALIM^{TM} yazılımı ile bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. İnceleme için numunelerin yüzeylerinden 4'er adet fotoğraf alınmıştır. Daha sonra her bir numune için 4'er fotoğrafın değerleri tespit edilmiş ve bu 4 değerin ortalaması alınarak kaplama numunelerinin faz bileşen değerleri hesaplanmıştır. Kantitatif faz analizinde, kaplama tabakası içerisindeki %SiC, %porozite ve %Al-12Si değerleri dikkate alınmıştır.

Kaplama sertlikleri, Vickers mikrosertlik ölçme yöntemiyle belirlenmiştir. Ölçümler kaplama arayüzeyi üzerinde SHIMADZU^{TM} marka HMV-02 model mikrosertlik cihazında tepe açısı 136^0 tabanı kare olan piramit Vickers ucu ile 50gr Yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik değerleri, yapılan 7 sertlik ölçümünün, minimum ve maksimum ölçüm değerlerinin gözardı edilerek hesaplanan ortalaması ile bulunmuştur. Mikrosertliğin ölçülmesinde sertlik izinin porozite, matris, matris-karbür veya sadece karbür üzerine düşüp düşmediğine dikkat edilmiştir.

XRD çalışmalarında, aşınma deneyi için seçilen 3 numunenin, BRUKER^{TM} D8-Advance X Işınları difraktometresi 40kV ve 40mA şartlarında CuK radyasyonu kullanılarak karakterizasyonu yapılmıştır. Bu çalışma 2^0/dk hızla gerçekleştirimiş ve mevcut fazların difraksiyon paternleri elde edilmiştir. Elde edilen paternlerde yabancı faz oluşumunun olup olmadığı üzerinde durulmuştur.

SEM çalışmaları JEOL^{TM} marka JSM-T330 model taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. İnceleme öncesi numune yüzeylerinde iletkenlik sağlamak

amacıyla numuneler yaklaşık $200A^0$'luk bir altın tabakası ile kaplanmıştır. Çekilen fotoğraflar üzerinde kaplamanın genel görünümü değerlendirilmiştir.

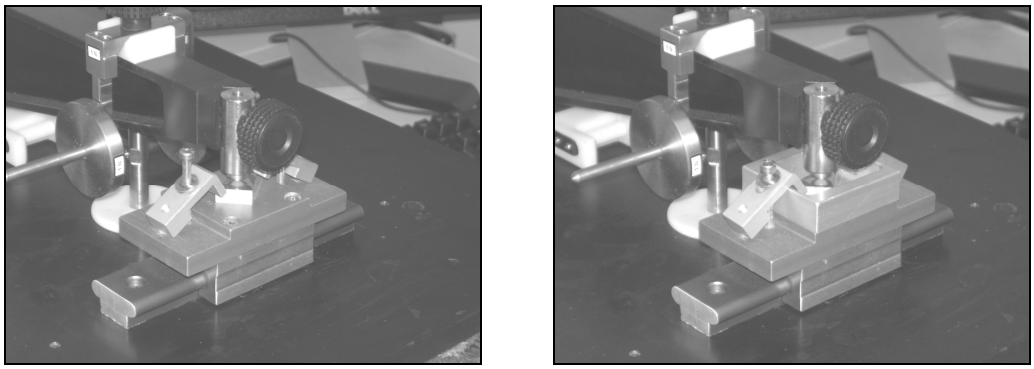
5.4 Aşınma Deneyleri

Bu çalışmada; aşınma deneyleri ve aşınma izlerinin karakterizasyonu yapılmıştır. Aşınma izlerinin karakterizasyonu; profilometre, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) çalışmaları ile yapılmıştır.

Aşınma deneyleri TRIBOTECHNIC firması tarafından üretilen salınım hareketli (reciprocating) TRIBOTESTER^{TM} aşınma test cihazında (Şekil 5.2) , kuru ve sıvı ortam sürtünme koşullarında (Şekil 5.3) gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sıvı ortam olarak saf su kullanılmıştır. Aşınma deneyi için seçilen 3 numune (ND4, ND8, ND10) , aşınma deneyinden önce Bölüm 5.3.'te belirtilen metalografik işleme tabi tutulmuş ve yüzeyleri parlatılmıştır. Kuru ve sıvı ortamın her ikisinde de karşı malzeme olarak 5mm çapında alümina (Al_2O_3) toplar kullanılmıştır. Kuru ve sıvı ortamda yapılan aşınma deneylerinin atmosferik şartları 30 ± 2^0C sıcaklık ve %30±2 nem seviyesidir. Deney yükü olarak her bir numune için 4 farklı yük uygulanmıştır, bunlar sırasıyla; 1N, 2N, 3N ve 5N'dur. Aşınma deneylerinde kayma hızı $5mms^{-1}$ ve strok 5mm olup, toplam kayma mesafesi 18000mm'dir. Aşınma deneyi verileri bilgisayar yazılımı ile kaydedilmiş ve deney esnasında sürekli değişen sürtünme katsayıları grafik olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.2: Tribotechnic firması tarafından üretilen Tribotester aşınma test cihazı genel görünümü.



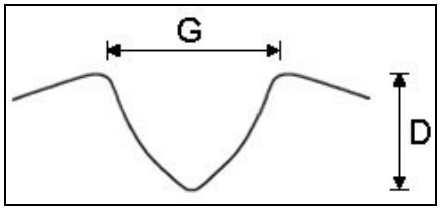
(a) (b)

Şekil 5.3: (a) kuru ve (b) sıvı ortam aşınma deneyi ortamı genel görünümleri.

Numunelerin aşınma direncini belirlemek amacıyla, deney sırasında yüzeyde oluşan aşınma izlerinin (Şekil 5.4) derinliği ve genişliği VEECO^{TM} marka DEKTAK 6M model yüzey profilometre cihazı yardımıyla belirlenmiş ve Eşitlik 5.1 ile aşınma hacimleri hesaplanmıştır.

SEM çalışmaları, JEOL^{TM} marka JSM-T330 model taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. İnceleme öncesi numune yüzeylerinde iletkenlik sağlamak amacıyla numuneler yaklaşık 200A^{0}'luk bir altın tabakası ile kaplanmıştır. Çekilen fotoğraflar üzerinde aşınma izlerinin genel görünümü ve aşınma sonrası karbür durumu değerlendirilmiştir.

OM çalışmalarında, LEICA^{TM} marka ve DM6000-M model optik mikroskop (OM) kullanılmış ve aşınma izleri fotoğraflanmıştır.

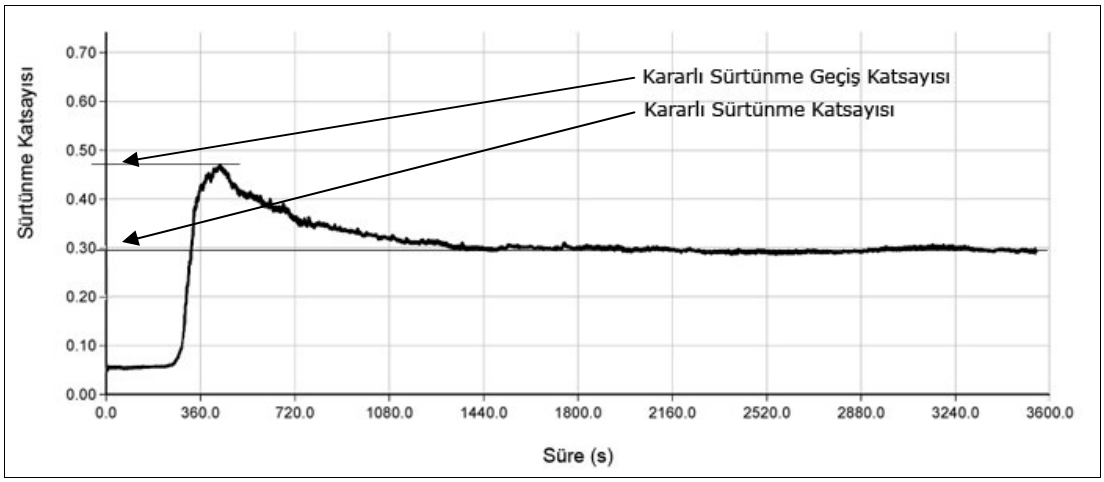


Şekil 5.4: Aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi.

$$V = \frac{\pi}{4} L.W.D \qquad \textbf{(5.1)}$$

V : Aşınma hacmi
L : Aşınma izinin uzunluğu (5 mm)
W : Aşınma izinin genişliği
D : Aşınma izinin derinliği olarak tanımlanmıştır.

Numunelerin kararlı sürtünme geçiş katsayısı bilgisayar yazılımı yardımıyla, deney başlangıcından sonra grafiğin pik yaptığı noktadan, kararlı sürtünme katsayısı ise bu pikten sonra kararlı hale geçtiği bölgenin ortalama değeri alınarak belirlenmiştir (Şekil 5.5) .



Şekil 5.5: Sürtünme katsayısı grafiği üzerinde kararlı sürtünme katsayısı ve kararlı sürtünme geçiş katsayısının belirlenmesi.

Aşınma deneyi çalışmalarında; ND4, ND8 ve ND10 kodlu numunelerin kuru ve sıvı ortamda farklı yüklerde aşınma davranışına, sürtünme katsayısı değişimine ve aşınma sonrası karbür durumuna odaklanılmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1 Kaplama Karakterizasyonu Sonuçları

Kaplamaların ortalama kalınlıkları, ortalama sertlikleri ve mikroyapı faz oranları Tablo 6.1'de verilmiştir. Kaplama kalınlıkları ve sertlikleri, numunelerin yüzeyleri parlatılıp, kesitleri bakalite alındıktan sonra ölçülmüştür. Kaplama tabakalarında farklı oranlarda karbür birikimi ve porozite görülmektedir. Toz karıştırma işlemleri yapıdaki karbür miktarını arttırmada etkili olmuştur. Altlık malzeme 2014-T4 alüminyumun sertliğine göre bir kıyaslama yapıldığında, üretilen tüm kaplamaların altlık malzemeye oranla sertliğinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sertlik değerinin, kaplama içerisindeki karbür oranına paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. En düşük sertlik değerlerine sahip ND1-2 ve ND3 numunelerinden ND3, en düşük karbür oranına sahipken, en yüksek sertliği elde ettiğimiz ND9 en yüksek karbür oranına sahiptir. Kaplamaların ortalama sertliklerinin belirlenmesinde kullanılan sertlik ölçüm değerleri Tablo A.1'de verilmiştir. Kaplama işlemi esnasında püskürtme tabancası manuel olarak kontrol edildiği için kaplama kalınlıkları farklılık göstermektedir.

Tablo 6.1: Kaplamaların ortalama kalınlık, sertlik ve %SiC, % Al-12Si, %Porozite değerleri.

Numune Kodu	Kaplama Kalınlığı (μm)	Sertlik ($Hv_{0,05}$)	%SiC	%Porozite	%Al-12Si	%Diğer
2014-T4	-	120				
ND1	140,3	145	Faz Analizi Yapılmamıştır.			
ND2	120,5	120				
ND3	163,1	142	4,3	1,6	94,1	
ND4	527,7	226	26,4	6,7	66,8	
ND5	410,7	216	31,1	7,8	60,9	
ND6	203,8	168	4,0	1,9	85,8	8,2(UDDP)
ND7	315,6	141	7,9	1,3	90,7	
ND8	530,9	164	11,8	0,8	87,6	
ND9	221,4	247	32,5	52,3	15,1	
ND10	540,4	171	7,2	0,5	92,2	

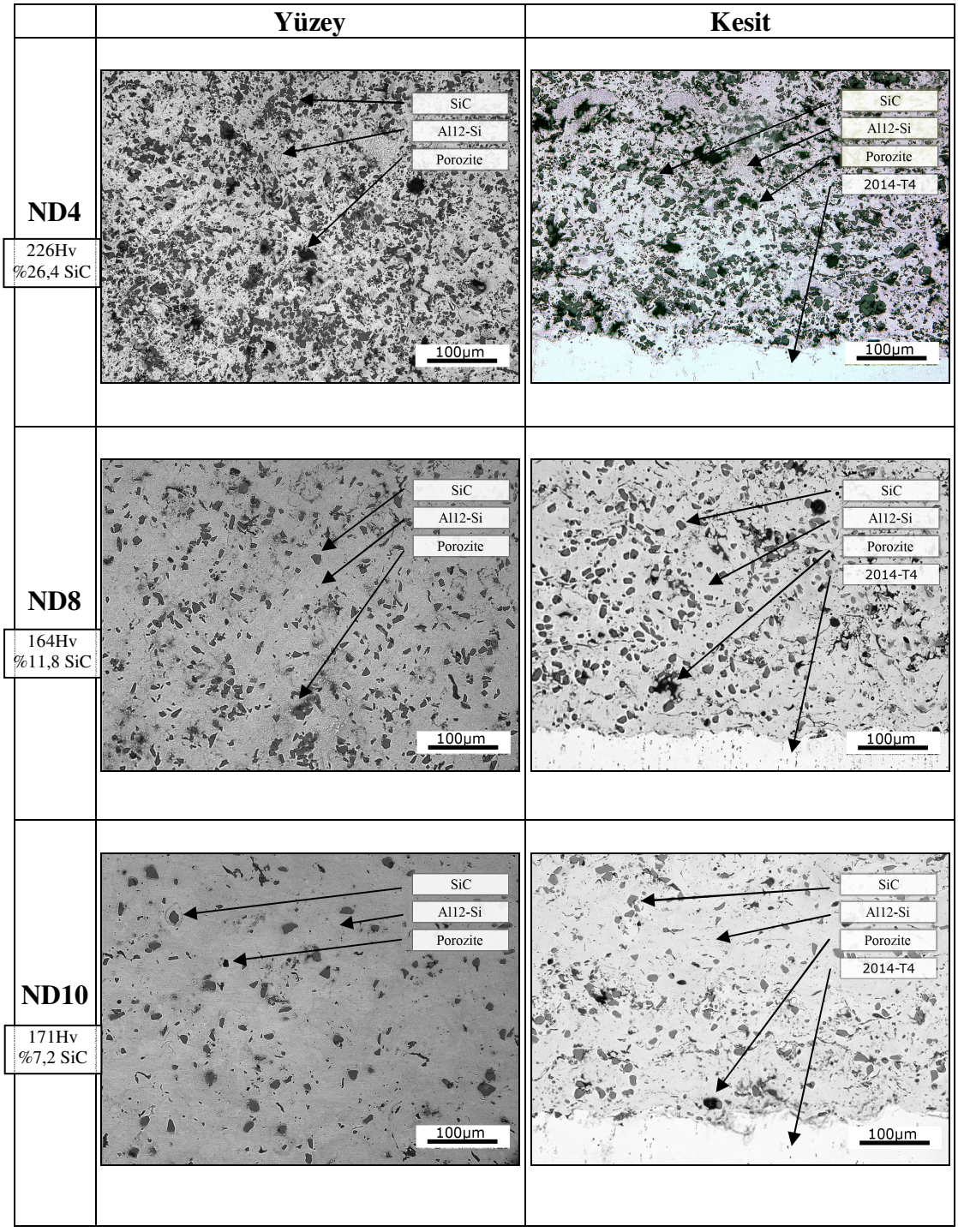
Sertlik değeri, porozite ve karbür miktarları göz önüne alarak aşınma deneylerinde incelenmek üzere ND4, ND8 ve ND10 numuneleri seçilmiştir. Aşınma deneyi için seçilen numunelerin ayrıltılı yüzey ve kesit fotoğrafları Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'deki fotoğraflarda siyaha yakın koyu bölgeler porozite, gri partiküller ise karbürü göstermektedir, bunların dışında kalan açık renkli yapı Al-12Si matrisi oluşturmaktadır. Kesit fotoğraflarında, beyaza yakın temiz açık renkli bölge 2014-T4 altlık malzemedir ve diğer kaplamalarda da kaplama tabakası bu bölge üzerine birikmektedir. Ayrıca bu üç kaplama için yapılan XRD çalışması sonucu kaplama tabakalarında herhangi bir yabancı bileşene raslanmamıştır (Şekil 6.2) . Metalografik çalışma sonrası kaplamaların yüzeyinden ve kesitinden alınan optik mikroskop fotoğrafları Şekil A.1-Şekil A.2'de verilmiştir. Faz oranı incelemeleri için kullanılan fotoğraflar Şekil A.3-Şekil A.10'da, sunulmuştur.

6.2 Aşınma Deneyi Sonuçları

Yapılan aşınma deneyleri sonrası kaplamaların ve altlık malzemenin üzerinde oluşan kuru ve sıvı ortam aşınma izlerine ait SEM fotoğrafları Şekil B.1-Şekil B.3'de, karşı malzeme Al_2O_3 topların üzerinde oluşan izlerin OM fotoğrafları Şekil B.4-Şekil B.7'de görülmektedir. Altlık malzeme ve kaplamaların profilometre cihazından elde edilen genişlik ve derinlik değerleriyle hesaplanan kuru ve sıvı ortamda 1N, 2N, 3N ve 5N altındaki aşınma hacimleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2: Altlık malzemenin ve kaplamaların deney yüküne bağlı kuru ve sıvı ortam aşınma hacimleri.

	1N Yükte Aşınma Hacmi (mm^3)x10^{-3}		**2N Yükte Aşınma Hacmi (mm^3)x10^{-3}**		**3N Yükte Aşınma Hacmi (mm^3)x10^{-3}**		**5N Yükte Aşınma Hacmi (mm^3)x10^{-3}**	
Numune	**Kuru Ortam**	**Sıvı Ortam**	**Kuru Ortam**	**Sıvı Ortam**	**Kuru Ortam**	**Sıvı Ortam**	**Kuru Ortam**	**Sıvı Ortam**
2014-T4	33,080	27,214	76,230	40,997	108,526	63,793	134,774	116,396
ND4	21,944	0,622	39,395	2,710	50,363	2,876	68,553	58,784
ND8	27,737	6,730	44,765	17,983	59,916	25,281	85,632	99,883
ND10	18,936	16,589	28,868	20,545	47,683	61,781	73,754	105,111



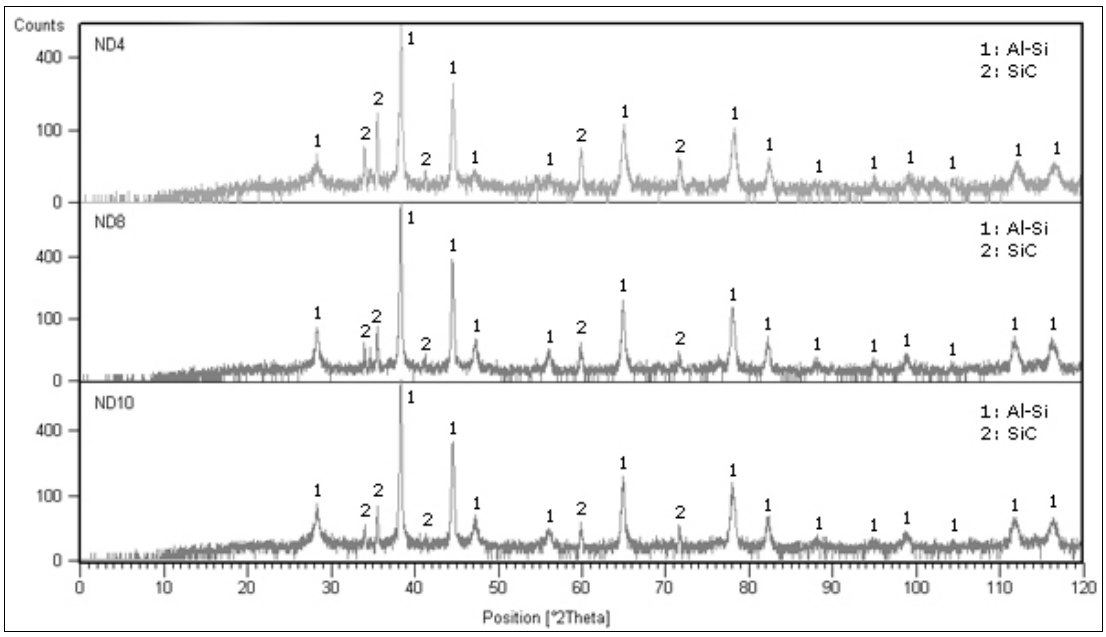
Şekil 6.1: Aşınma testi uygulanan ND4, ND8 ve ND10 kodlu kaplamaların optik mikroskop yüzey ve kesit fotoğrafları.

Tablo 6.2'de görüldüğü gibi kaplamaların aşınma dayanımı 2014-T4 kalite alüminyum altlık malzemeye göre daha iyidir. Saf su ortamı içerisinde yapılan deneylerde 2014-T4 alüminyum alaşımının ve kaplamaların aşınma miktarında azalma gözlemlenmiştir. Saf su içerisinde en fazla aşınma direncine sahip numune $226Hv_{0,05}$ sertliğe sahip %26,4 SiC içeren ND4 kodlu kaplamadır. ND4 kodlu kaplama saf su ortamında 1N yük altında kuru ortama göre yaklaşık 35 kat, 2014-T4

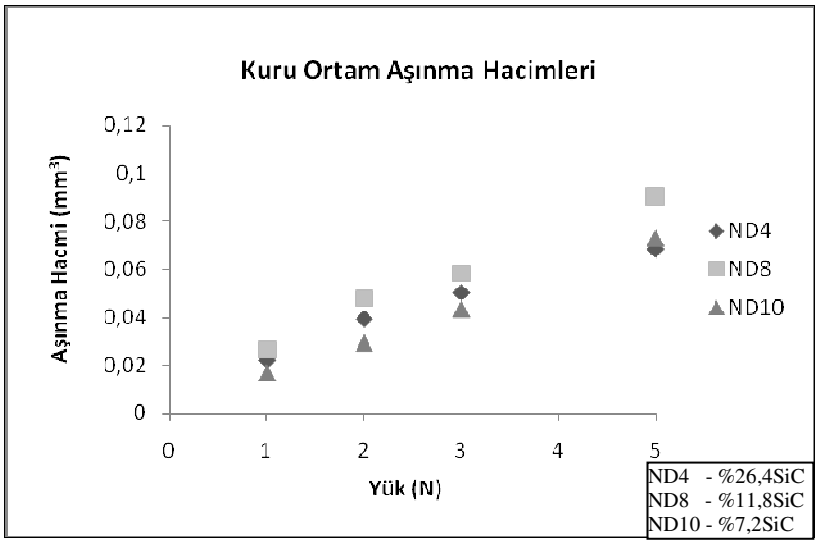
alüminyumun kuru ortam aşınma şartlarına göre yaklaşık 55 kat daha az aşınmıştır. Aşınma izi; derinlik ve genişlik ölçüm değerleri Tablo B.1'de, ortalama değerler Tablo B.2'de ve optik mikroskop görüntüleri Şekil B.8-Şekil B.13'de verilmiştir.

%7,2 SiC içeren ND10 kodlu kaplamanın sertliğinin, %11,8 SiC içeren ND8'e göre daha yüksek olmasına rağmen, kuru ortam koşullarında en az aşınan numune iken saf su ortamında en fazla aşınan numune olduğu belirlenmiştir. ND10 kodlu kaplama en düşük SiC oranına sahiptir ve yapıdaki SiC oranının saf su ortamında aşınma hacmine etki ettiği görülmektedir.

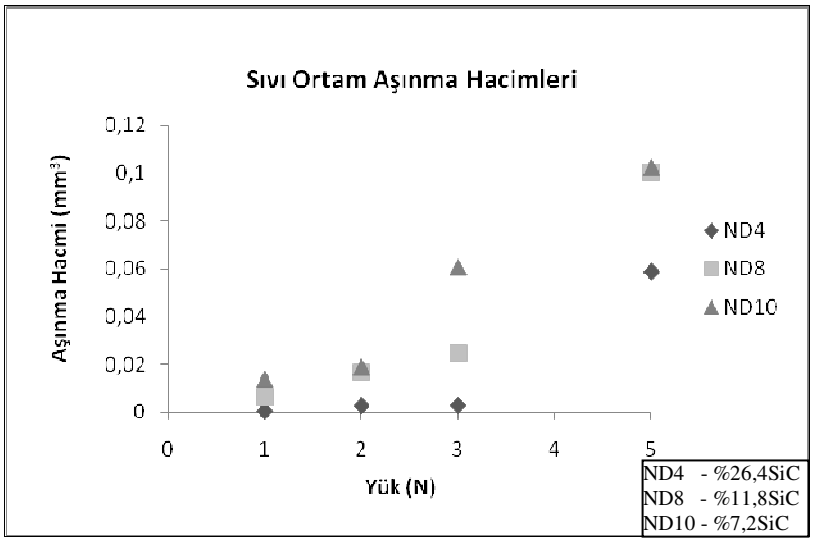
Kaplamalar, saf su koşullarında belirli yük aralıklarından sonra kuru ortam aşınma hacmi değerlerine yaklaşmaktadır. Bu durum ND10 kodlu kaplama için 2-3N aralığı ve ND8 kodlu kaplama için 3-5N aralığında görülmektedir. ND4 kodlu kaplamada ise 3-5N aralığında bu eğilimin başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.3).



Şekil 6.2: ND4, ND8 ve ND10 kodlu kaplamalar için X-ışınları difraksiyometresi sonuçları, (1:Al-Si, 2:SiC) .



(a)



(b)

Şekil 6.3: (a) Kuru ve (b) saf sulu ortamlarda Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde aşınma hacimlerinin deney yükü ile değişimi.

Kuru ve sıvı ortam aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısı değişim grafikleri Şekil B.14-Şekil B.17'de verilmiştir. Sürtünme grafiklerinde, sürtünme katsayısının deney başlangıcından sonra maksimuma ulaşarak pik yaptığı ve daha sonra yatay eksende kararlı hale gelerek devam ettiği görülmüştür. Bu durum saf su ortamı içerisinde yapılan deneylerde daha net görülmüş ve kuru ortama nazaran sürtünme katsayısının pik sonrası daha düşük bir değerde kararlı hale geçtiği belirlenmiştir. 2014-T4 alüminyum için pik sonrası düşüş olmamaktadır. Grafiklerden elde edilen kararlı sürtünme geçiş katsayısı Tablo 6.3'te, kararlı sürtünme katsayısı Tablo 6.4'te verilmiştir.

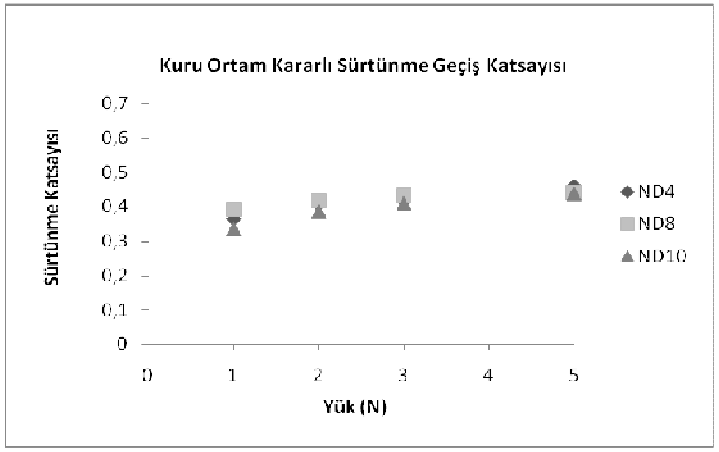
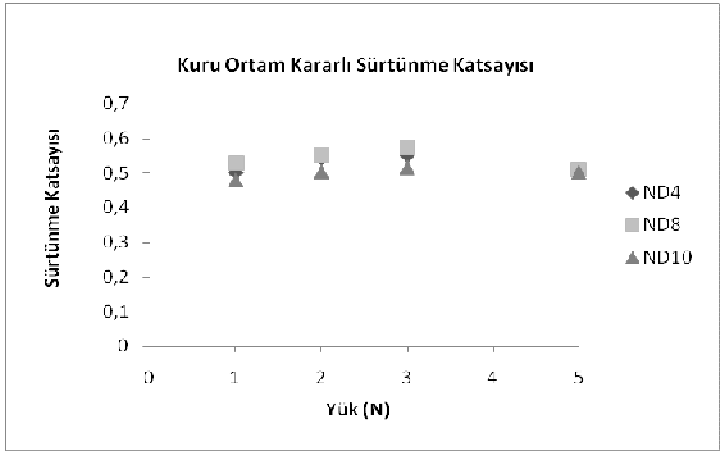
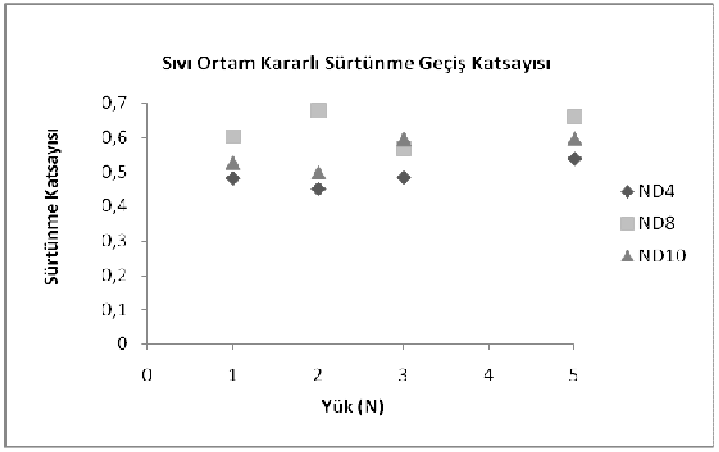
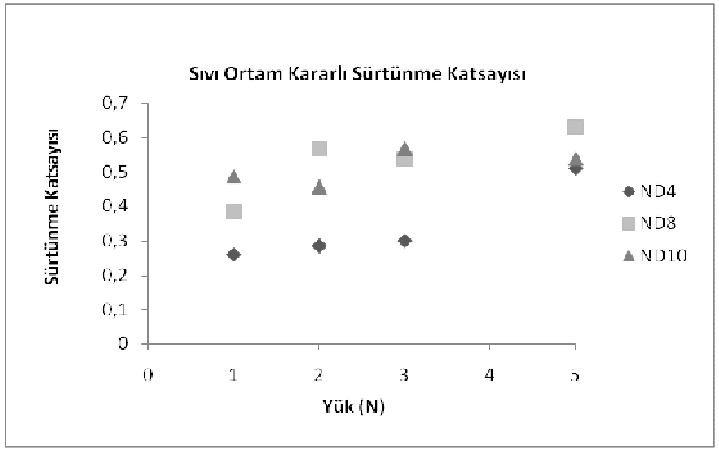
Tablo 6.3: Kaplamaların 1N, 2N, 3N ve 5N yükte kuru ve sıvı ortam koşullarında kararlı sürtünme geçiş katsayıları.

	1N Yükte Kararlı Sürtünme Geçiş Katsayısı		2N Yükte Kararlı Sürtünme Geçiş Katsayısı		3N Yükte Kararlı Sürtünme Geçiş Katsayısı		5N Yükte Kararlı Sürtünme Geçiş Katsayısı	
Numune	**Kuru Ortam**	**Sulu Ortam**	**Kuru Ortam**	**Sulu Ortam**	**Kuru Ortam**	**Sulu Ortam**	**Kuru Ortam**	**Sulu Ortam**
ND4	0.364	0.481	0.407	0.450	0.416	0.483	0.461	0.538
ND8	0.393	0603	0.418	0.678	0.433	0.568	0.441	0.660
ND10	0.336	0.528	0.385	0.499	0.409	0.596	0.438	0.597

Tablo 6.4: Kaplamaların 1N, 2N, 3N ve 5N yükte kuru ve sıvı ortam koşullarında kararlı sürtünme katsayıları.

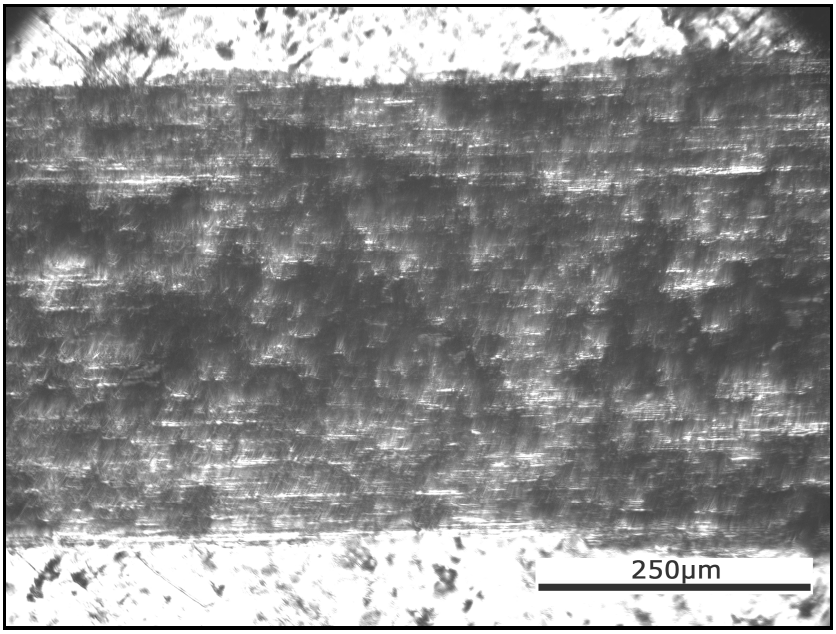
	1N Yükte Kararlı Sürtünme Katsayısı		2N Yükte Kararlı Sürtünme Katsayısı		3N Yükte Kararlı Sürtünme Katsayısı		5N Yükte Kararlı Sürtünme Katsayısı	
Numune	**Kuru Ortam**	**Sulu Ortam**	**Kuru Ortam**	**Sulu Ortam**	**Kuru Ortam**	**Sulu Ortam**	**Kuru Ortam**	**Sulu Ortam**
ND4	0.501	0.260	0.542	0.285	0.549	0.301	0.504	0.510
ND8	0.529	0.384	0.553	0.565	0.576	0.537	0.510	0.630
ND10	0.479	0.487	0.504	0.457	0.516	0.568	0.502	0.539

Şekil 6.4'de Aşınma deneyi numuneleri için kuru ve saf su ortamı koşullarında kararlı sürtünme katsayısı ve geçiş katsayısı karşılaştırmalı grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerden de görüldüğü gibi kuru ortamda yapılan deneylerde numunelerin kararlı sürtünme katsayıları, geçiş katsayılarından daha yüksek değerlere sahiptir. Saf su ortamında ise sürtünme katsayısı, geçiş katsayısının daha altında bir değerde kararlı hale gelmiştir. Bu durum özellikle ND4 kodlu numunede daha belirgin görülmektedir.

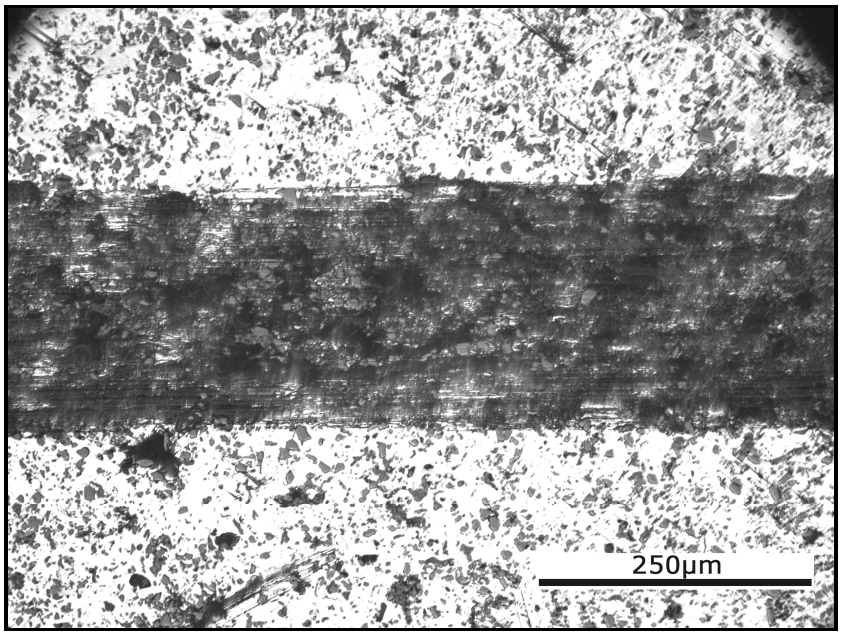
	Kararlı Sürtünme Geçiş Katsayısı	Kararlı Sürtünme Katsayısı
Kuru Ortam		
Sıvı Ortam		

Şekil 6.4: ND4, ND8 ve ND10 kodlu numuneler için kuru ve saf su ortamı koşullarında kararlı, sürtünme katsayısı ve geçiş katsayısı .

Saf su ortamında yapılan aşınma deneylerinde, kaplama içerisindeki SiC patiküllerinin tabakadan ayrılmadığı deney sonunda yerini koruduğu gözlemlenmiştir. Bu durum en belirgin şekilde ND 4 kodlu numunede görülmektedir (Şekil 6.5).

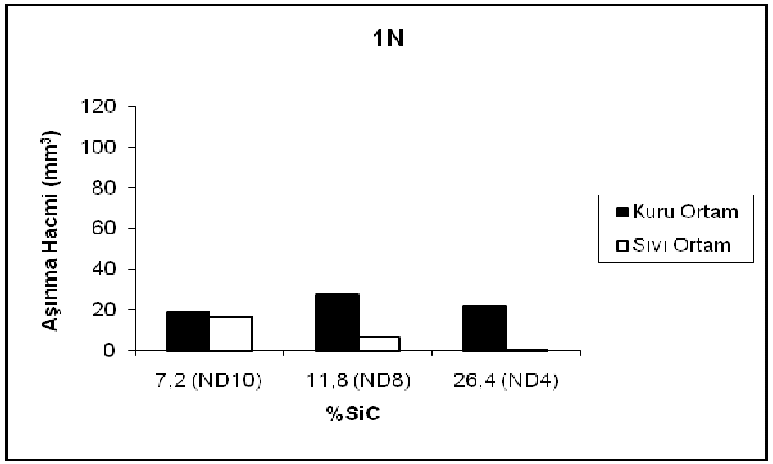


(a)

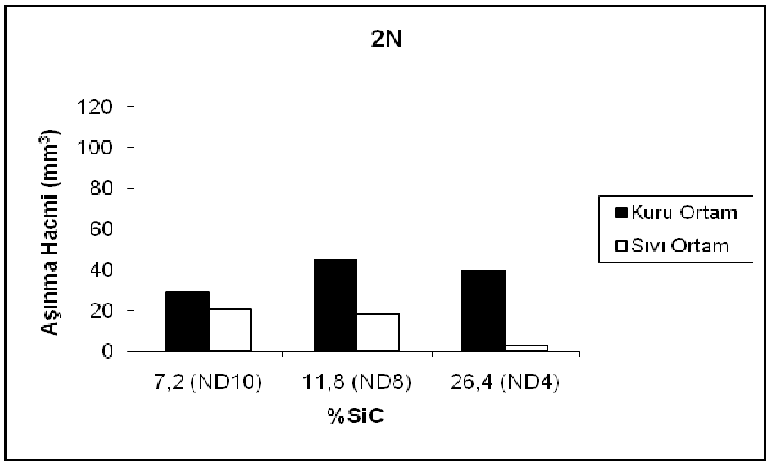


(b)

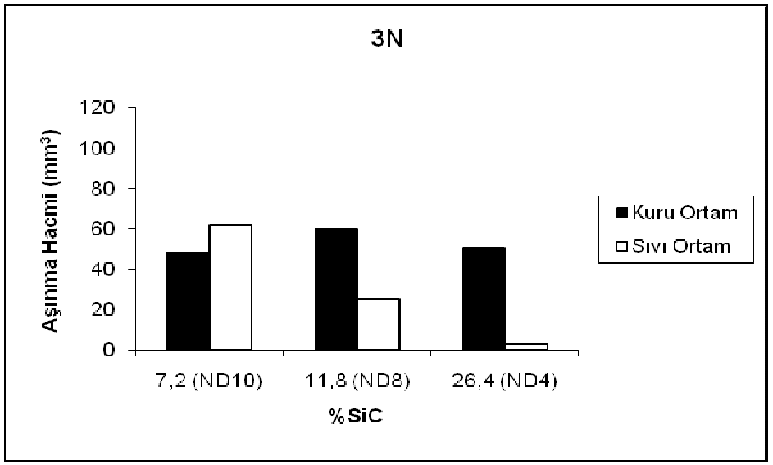
Şekil 6.5: ND4 kodlu numune için 1N yük altında (a) kuru ve (b) saf su ortamı koşullarında oluşan aşınma izlerinin OM fotoğrafları.



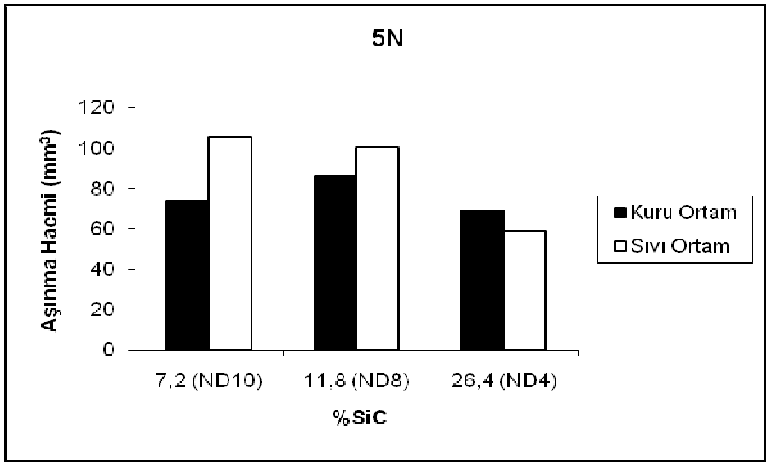
(a)



(b)

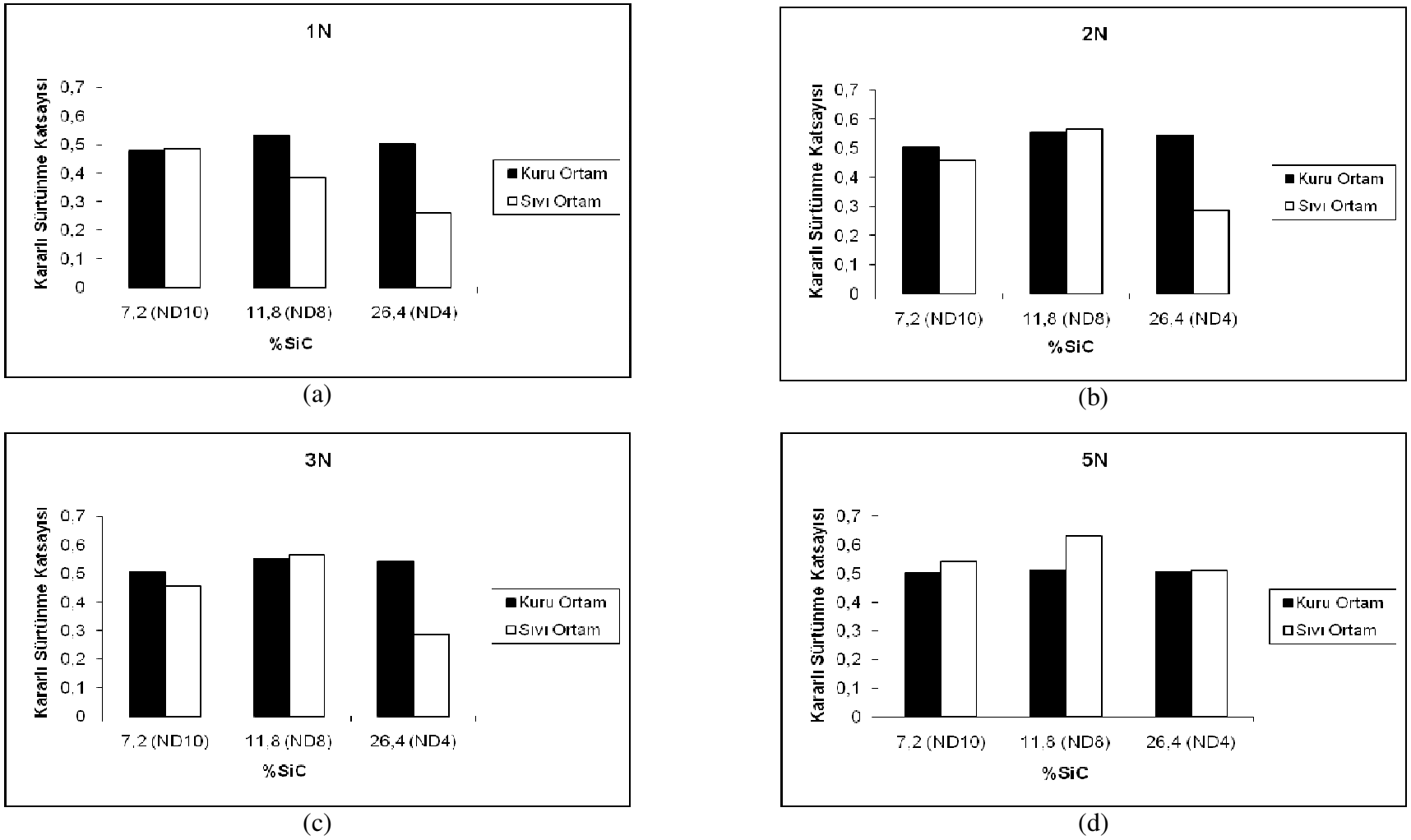


(c)



(d)

Şekil 6.6: ND4, ND8 ve ND10 kodlu numunelerin (a)1N, (b)2N, (c)3N ve (d)5N'da karşılaştırmalı %SiC-Aşınma Hacmi grafikleri .



Şekil 6.7: ND4, ND8 ve ND10 kodlu numunelerin (a)1N, (b)2N, (c)3N ve (d)5N'da karşılaştırmalı %SiC-Kararlı Sürtünme Katsayısı grafikleri .

7. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında değişik oranlarda SiC ve Al-12Si içeren toz karışımları plazma püskürtme tekniği ile 2014-T4 kalite alüminyum alaşımı üzerine püskürtülerek kompozit kaplama oluşturulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Plazma püskürtme işlemi esnasında SiC tozlarının yanması nedeniyle kaplamaların yapısında bulunan karbürün miktarı başlangıç toz karışımın oranlarından daha düşük elde edilmiştir. Toz karışımın oranları sabit kalmak kaydıyla, kaplama öncesi yapılan toz karıştırma işlemlerinin ortam ve parametrelerinin değiştirilmesi, kaplama sonrası yapıdaki karbür oranı artırılmıştır.

2. Toz karıştırma işlemleri için kullanılan üç farklı karıştırıcı arasından pleneter karıştıcı, kaplama yapısında en yüksek karbür birikimi sağlayan kompozit tozun hazırlandığı karıştırıcı olmuştur.

3. Kaplama yapısındaki karbür miktarının artmasıyla 2014-T4 alüminyum alaşımının yüzey sertliği artmaktadır. 2014-T4 alaşımının sertliği 120 $HV_{0,05}$ olup, en yüksek sertlik 226 $HV_{0,05}$ olarak, % 26 oranında SiC içeren Al-12Si matrisli kompozit kaplamada elde edilmiştir.

4. Kuru ortamda yapılan aşınma deneylerinde deney yükü arttıkça aşınma hacmi önemli oranda artmıştır. Sürtünme katsayısında ise, bir miktar artış gözlenmiştir. Sertliği en yüksek olan SiC takviyeli kompozit kaplama en yüksek aşınma direncini göstermiştir.

5. Saf su ortamında yapılan aşınma deneylerinde % 26 SiC içeren kaplama kuru ortamdakine aşınma davranışından farklı bir davranış sergilemiştir. 3 N'dan daha düşük deney yüklerinde hem aşınma hacmi ve hemde sürtünme katsayısı önemli oranda azalmıştır. Kaplamadaki SiC miktarının azalması ile benzer davranış daha düşük deney yüklerinde gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Kılıç, F.**, 2006. Alüminyum Üzerine Uygulanan Kompozit Kaplamaların Aşınma Davranışının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] **Sarıkaya, Ö.**, 2003. Al-12Si Malzeme Üzerine Plazma Püskürtme Tekniği ile Al-Si+B_4C Kaplama, *Doktora Tezi,* Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[3] **Toplan, N.**, 2001. Plazma Püskürtme Kaplama Tekniği ile Seramik Esaslı Şekilli Parça (Zirkonya Esaslı Tüp) Üretimi, *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[4] **Üstel, F.,** 1995, Plazma Sprey Kaplama Tekonolojisi ve Karaterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] **Thorpe, L. M.**, 1993. Thermal Spray Industry, *Advanced Materials & Processes*, **9**, 50-60.

[6] **Sulzer Metco - Atmospheric Plasma Spray**, http://www.sulzermetco.com/en/desktopdefault.aspx/tabid-1741//3381_read-5289/, 25.06.2008.

[7] **Sulzer Metco - Thermal Spray Products**, http://www.sulzermetco.com.cn/Sulzer%20Metco-Products-thermalspray-equi-plasmgun.htm, 25.06.2008.

[8] **Li, J.F., Huang, J.Q., Tan, S.H., Cheng, Z.M. and Ding, C.X.**, 1998. Tribological Properties of Silicon Carbide under Water-Lubricated Sliding, *Wear,* **218**, 167-171.

[9] **Chen, M., Kato, K. and Adachi, K.**, 2001. Friction and Wear of Self-Mated SiC and Si_3N_4 Sliding in Water, *Wear,* **250**, 246-255.

[10] **Rani, D.A., Yoshizawa, Y., Hyuga, H., Hirao, K. and Yamauchi, Y.**, 2004. Tribological Behavior of Ceramics Materials (Si_3N_4, SiC and Al_2O_3) in Aqueous Medium, *Journal of the European Ceramic Society*, **24**, 3279-3284.

[11] **Mindivan, H., Kayali, E.S. and Cimenoglu, H.**, 2008. Tribological Behavior of Squeeze Cast Aluminium Matrix Composites, *Wear*, **265**, 645-654.

[12] **Gao, Y.M., Fang, L., Su, J.Y. and Xu, X.W.**, 1997. An Investigation on Component and Formation of Tribochemical Film in Si_3N_4-White Iron Sliding Pair Lubricated with Distilled Water, *Tribology International*, **30**, 693-700.

[13] **Gao, Y.M., Fang, L., Su, J.Y. and Xie, Z.G.**, 1996. Investigation on the Components and Formation of a Tribochemical Film in the Si_3N_4-Gray Iron Sliding Pair Lubricated with Distilled Water, *Wear*, **206**, 87-93.

[14] **Saito, T., Imada, Y. and Honda, F.**, 1999. The Role of a Reactant Film on Water-Lubricated Si_3N_4/hBN Surfaces, *Tribology Series*, **36**, 423-432.

[15] **Kumar, B.V.M., Basu, B., Murthy, V.S.R. and Gupta, M.**, 2005. The Role of Tribochemistry on Fretting Wear of Mg-SiC Particulate Composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **36**, 13-23.

[16] **Xingzhong, Z., Jiajun, L., Hezhou, M. and Zhenbi, L.**, 1999. Wear Behavior of Si_3N_4 Ceramic Cutting Tool Material Against Stainless Steel in Dry and Water-Lubricated Conditions, *Ceramics International*, **25**, 309-315.

[17] **Gui, M. and Kang S. B.**, 2000. 6061Al/Al-SiC_p Bi-Layer Composites Produced by Plasma-Spraying Process, *Materials Letters*, **46**, 296-302.

[18] **Zhao, N., Nash, P. and Yang X.**, 2005. The Effect of Mechanical Alloying on SiC Distribution and the Properties of 6061 Aluminum Composite*, Journal of Materials Processing Technology*, **170**, 586-592.

[19] **Lu, L., Lai, M. O. and Ng, C. W.**, 1998. Enhanced Mechanical Properties of an Al Based Metal Matrix Composite Prepared Using Mechanical Alloying, *Materials Science and Engineering A*, **252**, 203-211.

[20] **Gui, M. and Kang S. B.**, 2001. Aluminum Hybrid Composite Coatings Containing SiC and Graphite Particles by Plasma Spraying, *Materials Letters* **51**, 396-401.

[21] **Euh K. and Kang S. B.**, 2005. Effect of Rolling on The Thermo-Physical Properties of SiCp/Al Composites Fabricated by Plasma Spraying, *Materials Science and Engineering A*, **395**, 47-52.

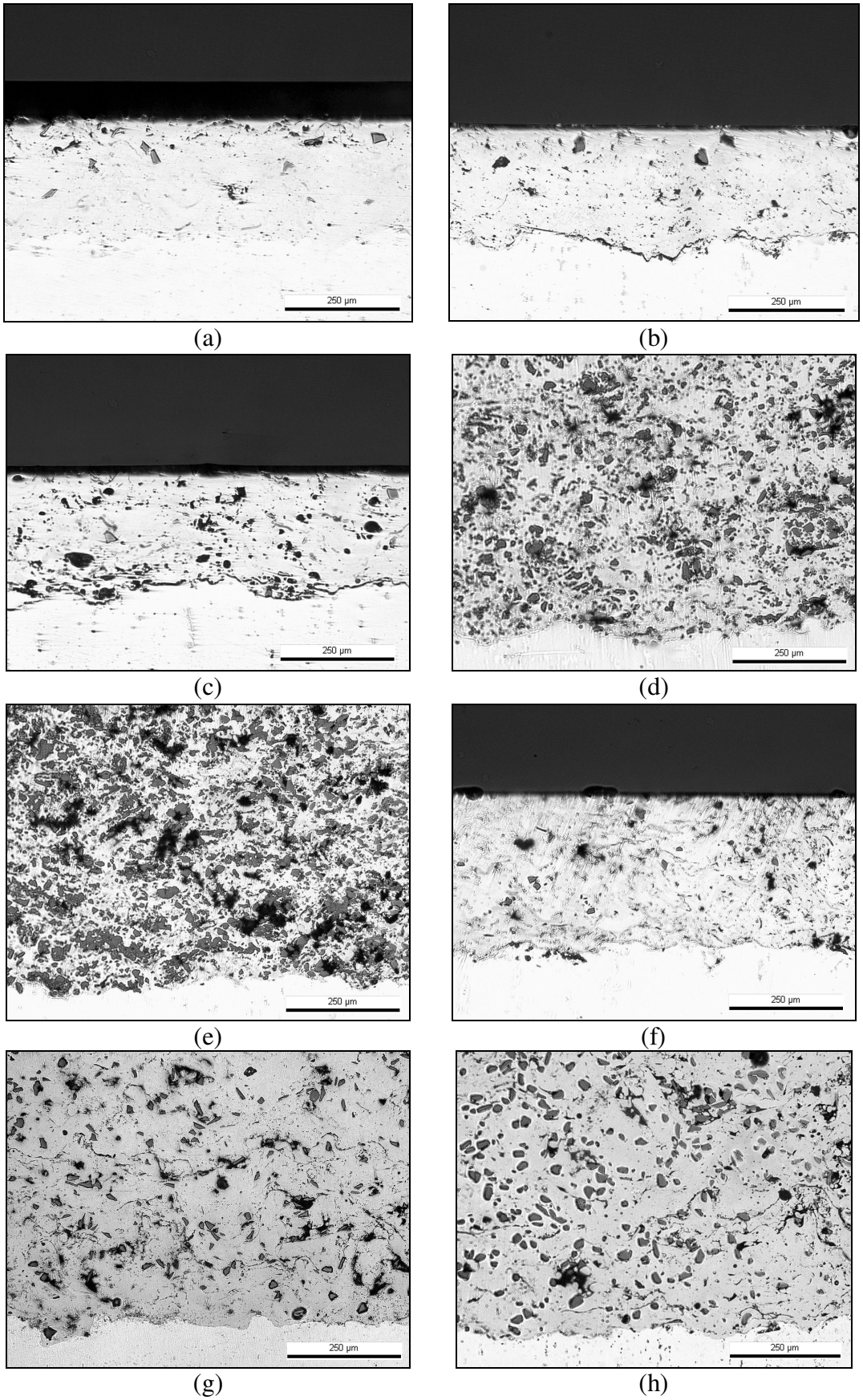
[22] **Gui, M., Kang, S. B. and Euh, K.**, 2005. Thermal Conductivity of Al-SiC_p Composites by Plasma Spraying, *Scripta Materialia*, **52**, 51-56.

[23] **Gui, M., Kang S. B. and Euh, K.**, 2004. Al-SiC Powder Preparation for Electronic Packaging Aluminium Composites by Plasma Spray Processing, *Journal of Thermal Spray Technology*, **13**, 214-222.

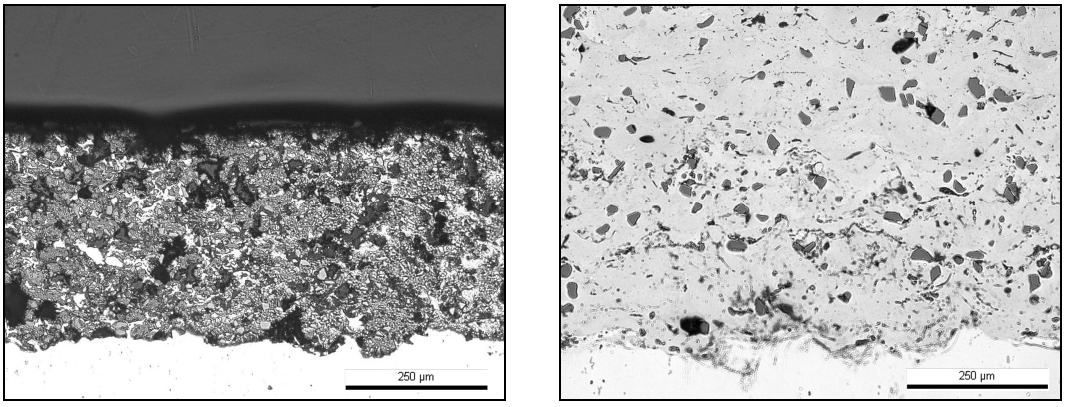
EK A

Tablo A.1: Kaplamaların ölçülen sertlik, ortalama sertlik ve standart sapma değerleri.

Kaplama Kodu	1. Ölçüm ($Hv_{0,05}$)	2. Ölçüm ($Hv_{0,05}$)	3. Ölçüm ($Hv_{0,05}$)	4. Ölçüm ($Hv_{0,05}$)	5. Ölçüm ($Hv_{0,05}$)	6. Ölçüm ($Hv_{0,05}$)	7. Ölçüm ($Hv_{0,05}$)	Ortalama
ND1	161	143	140	138	246	145	111	145±9
ND2	140	90	124	91	108	137	162	120±20
ND3	129	144	152	142	178	129	146	142±8
ND4	266	203	249	187	229	286	156	226±32
ND5	103	258	213	255	338	137	219	216±48
ND6	173	177	90	245	151	170	170	168±10
ND7	176	118	148	114	147	152	140	141±14
ND8	200	170	165	139	158	122	188	164±18
ND9	159	188	251	583	283	320	222	247±51
ND10	170	207	155	185	128	167	178	171±11

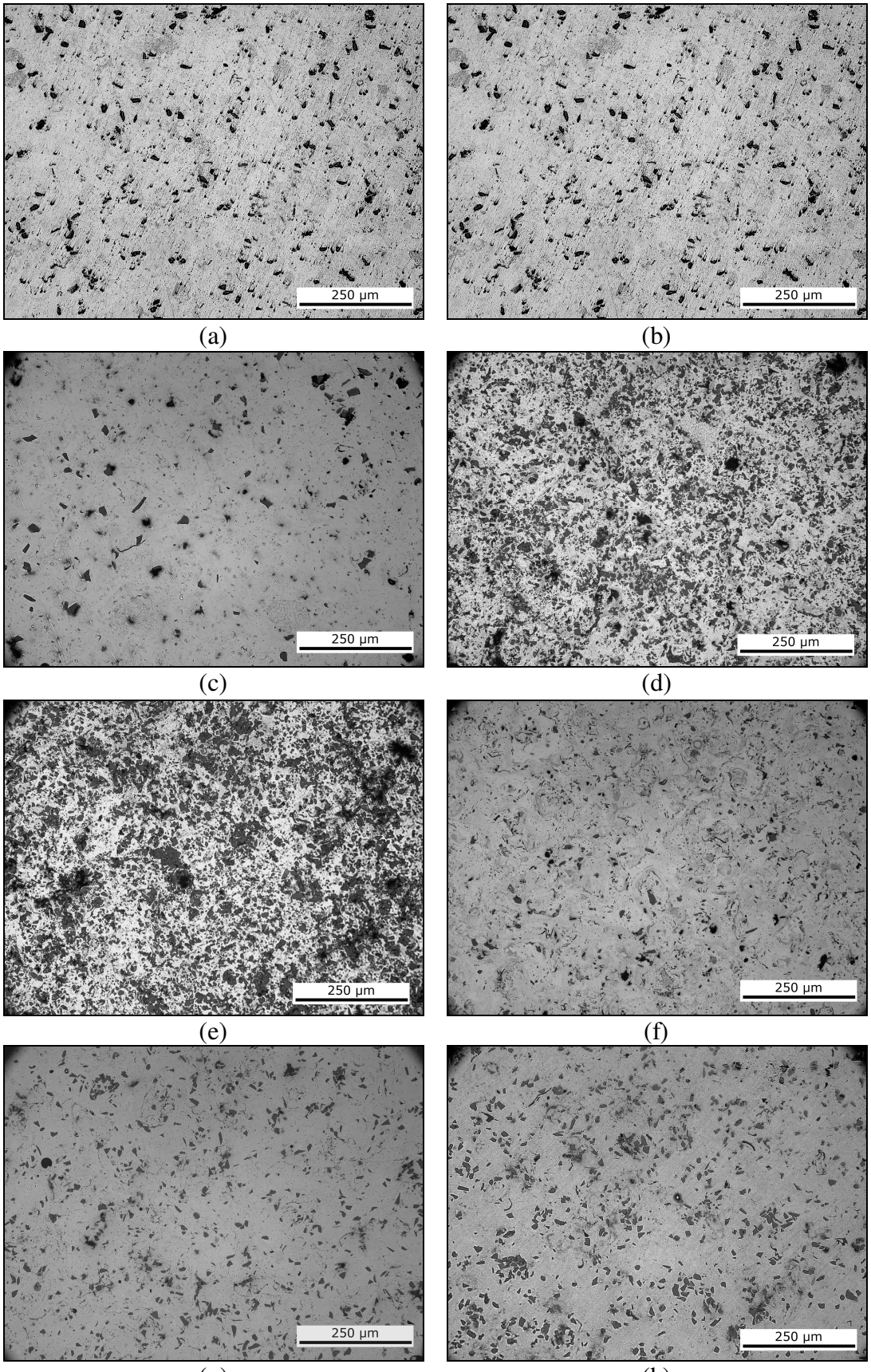


Şekil A.1: Kaplamaların optik mikroskop kesit fotoğrafları; (a) ND1, (b) ND2, (c) ND3, (d) ND4, (e) ND5, (f) ND6, (g) ND7, (h) ND8, (i) ND9, (j) ND10.

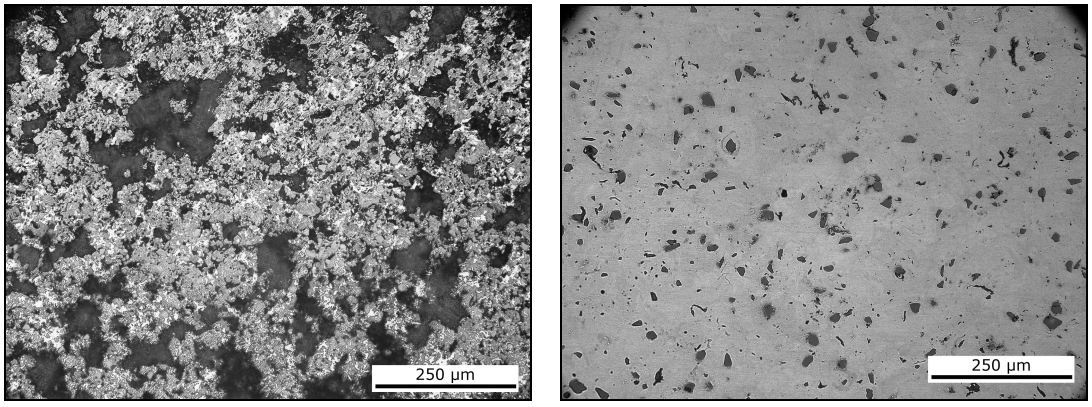


(i) (j)

Şekil A.1: Kaplamaların optik mikroskop kesit fotoğrafları; (a) ND1, (b) ND2, (c) ND3, (d) ND4, (e) ND5, (f) ND6, (g) ND7, (h) ND8, (i) ND9, (j) ND10 (Devam).

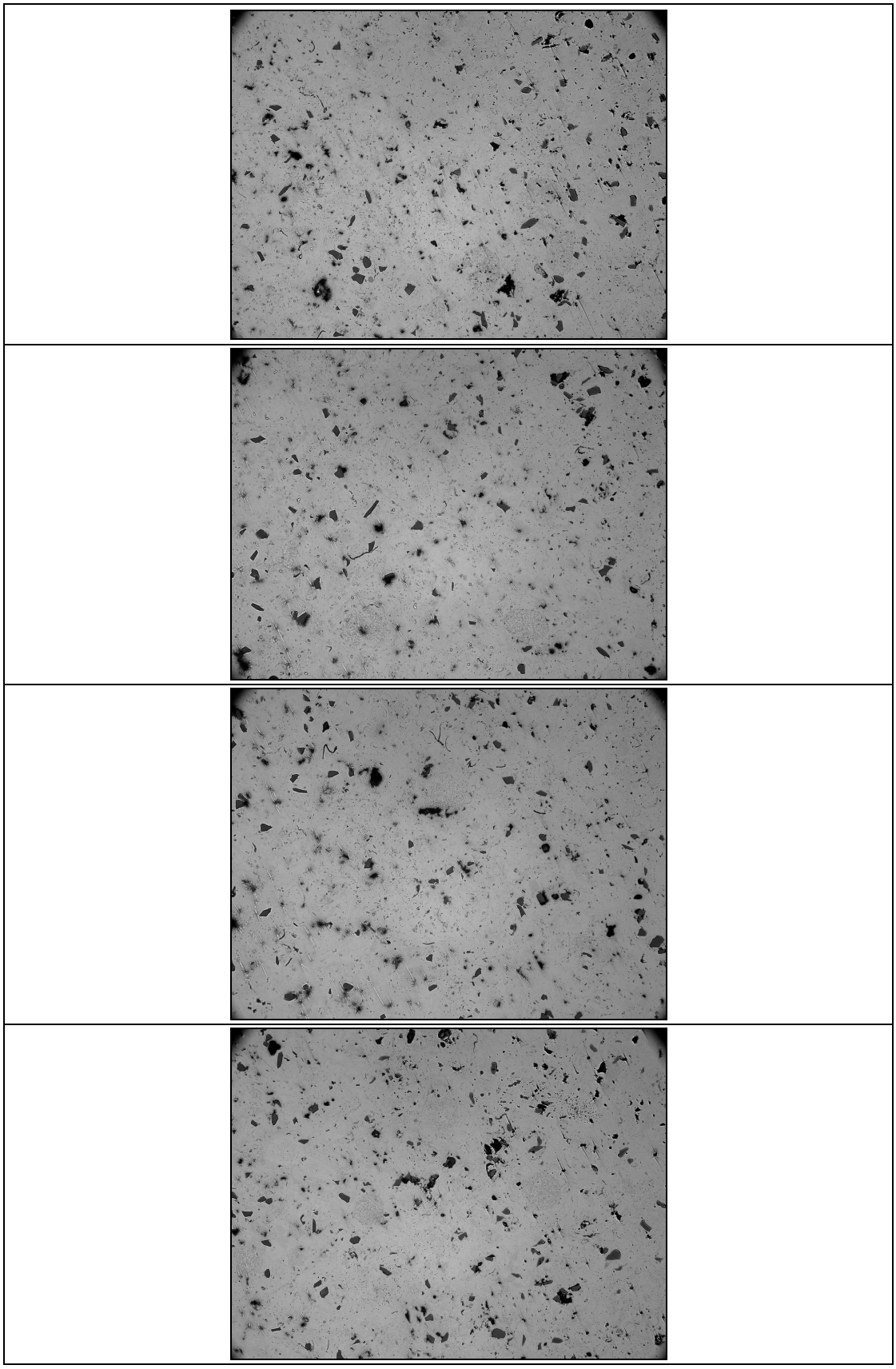


Şekil A.2: Kaplamaların optik mikroskop yüzey fotoğrafları; (a) ND1, (b) ND2, (c) ND3, (d) ND4, (e) ND5, (f) ND6, (g) ND7, (h) ND8, (i) ND9, (j) ND10.

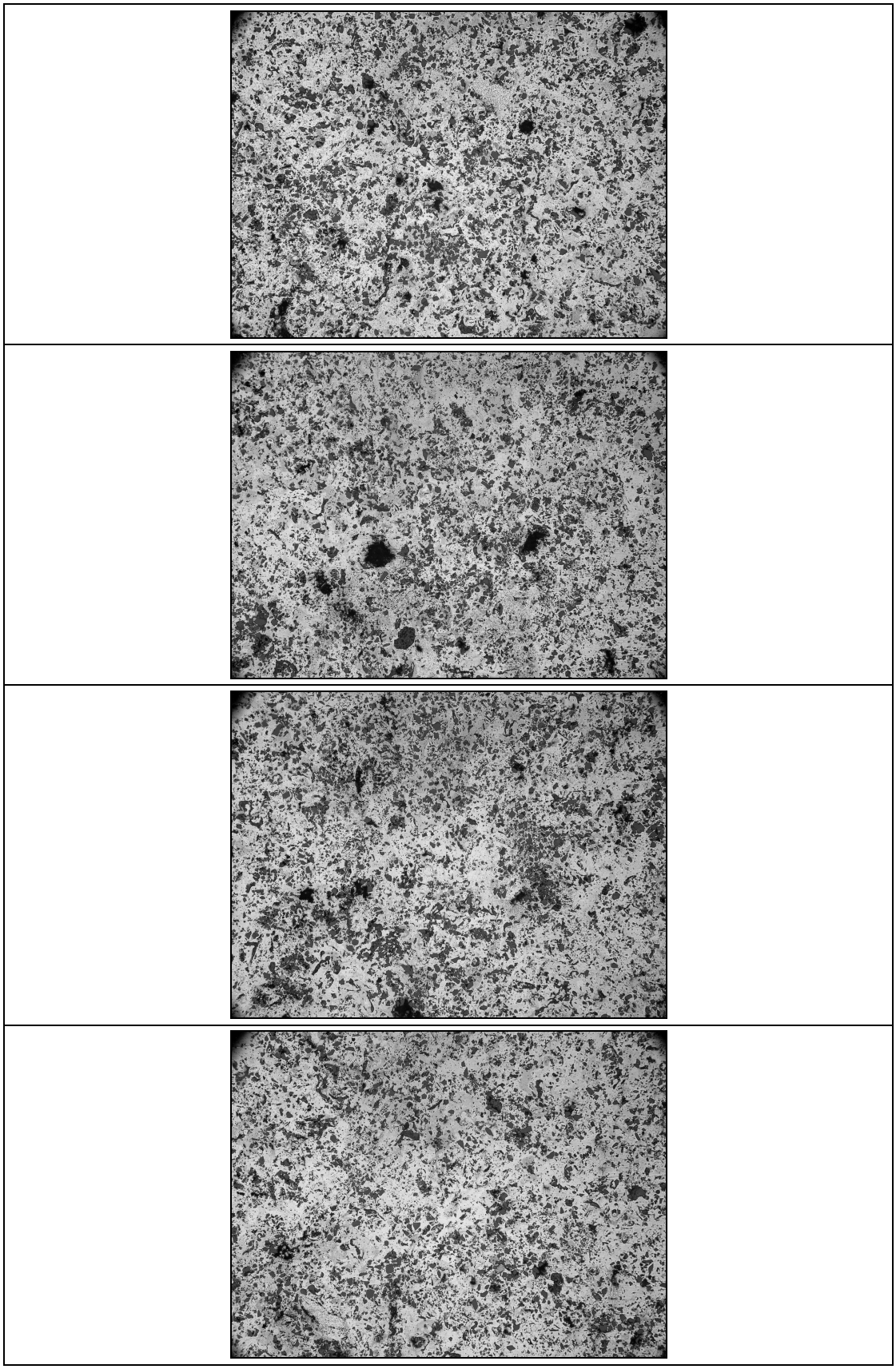


(i) (j)

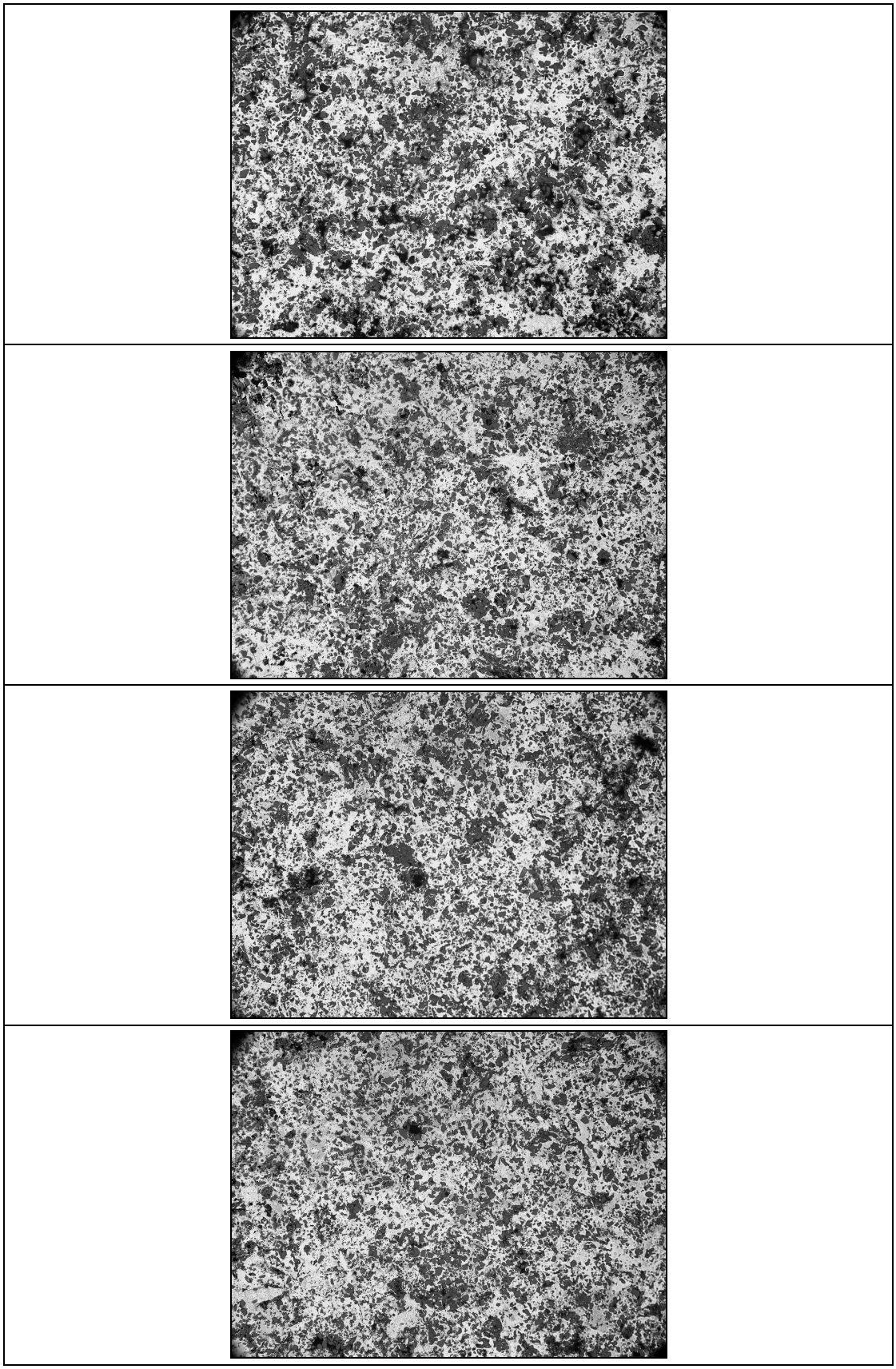
Şekil A.2: Kaplamaların optik mikroskop yüzey fotoğrafları; (a) ND1, (b) ND2, (c) ND3, (d) ND4, (e) ND5, (f) ND6, (g) ND7, (h) ND8, (i) ND9, (j) ND10 (Devam).



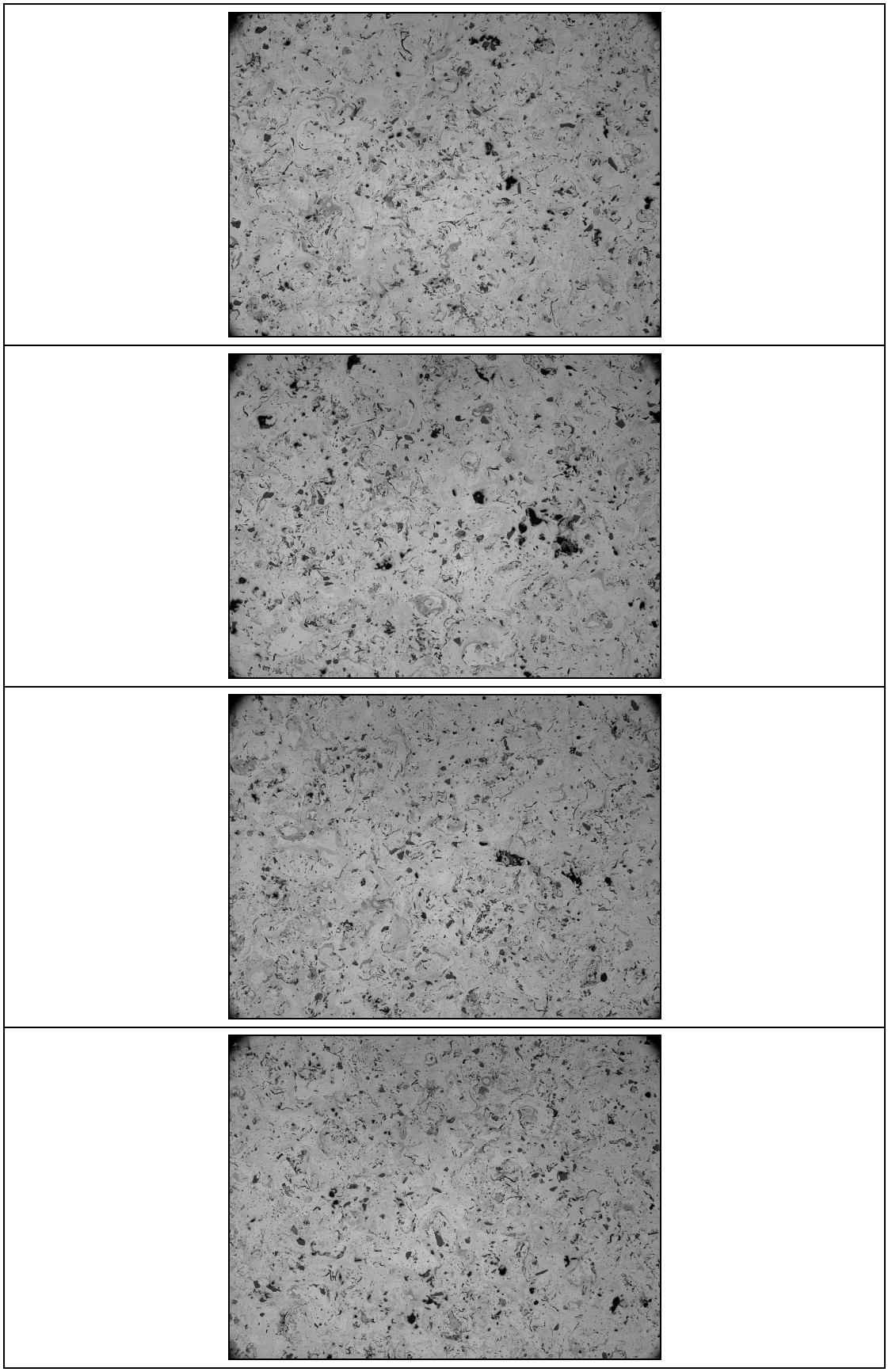
Şekil A.3: ND3 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200).



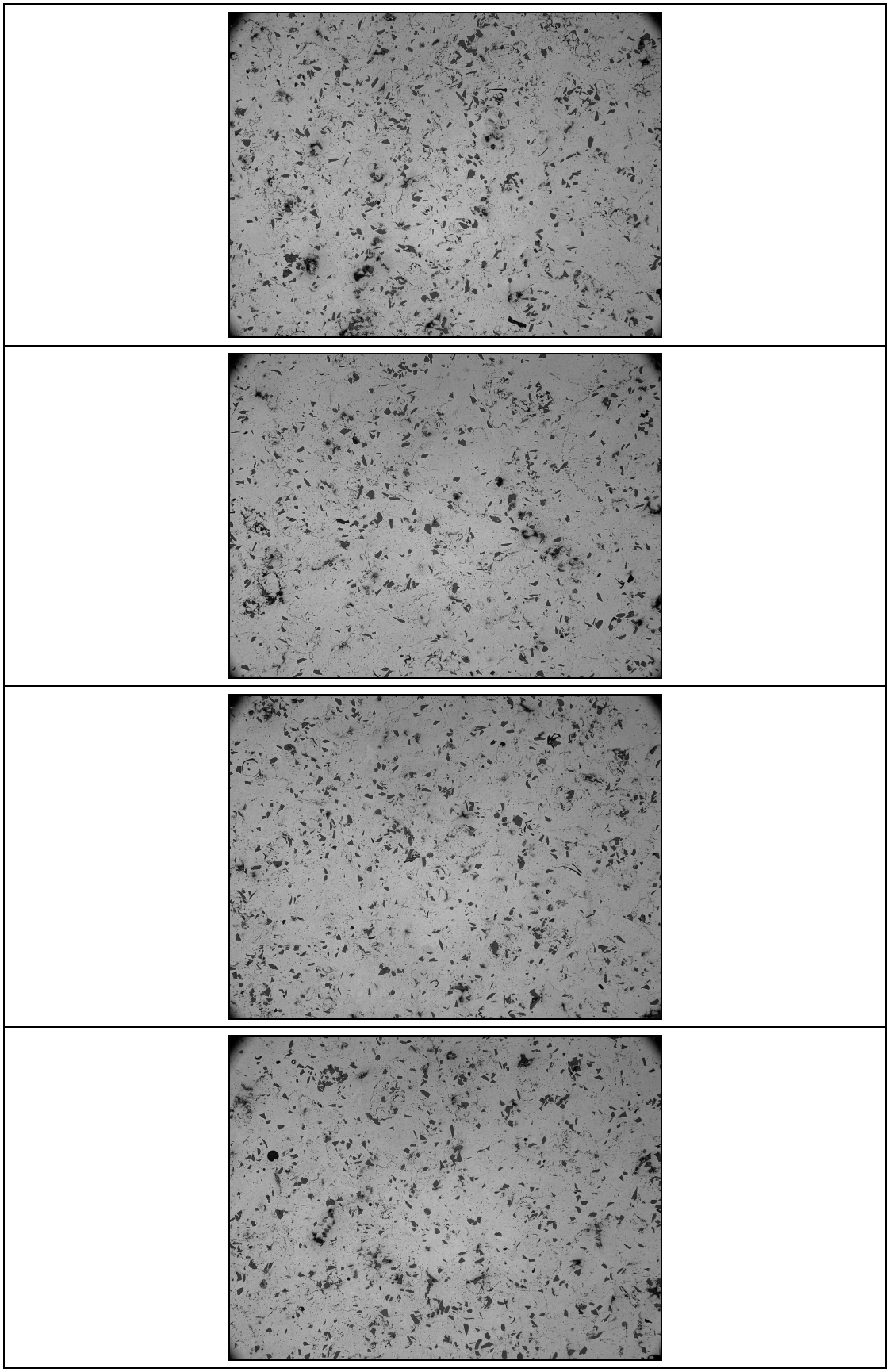
Şekil A.4: ND4 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200).



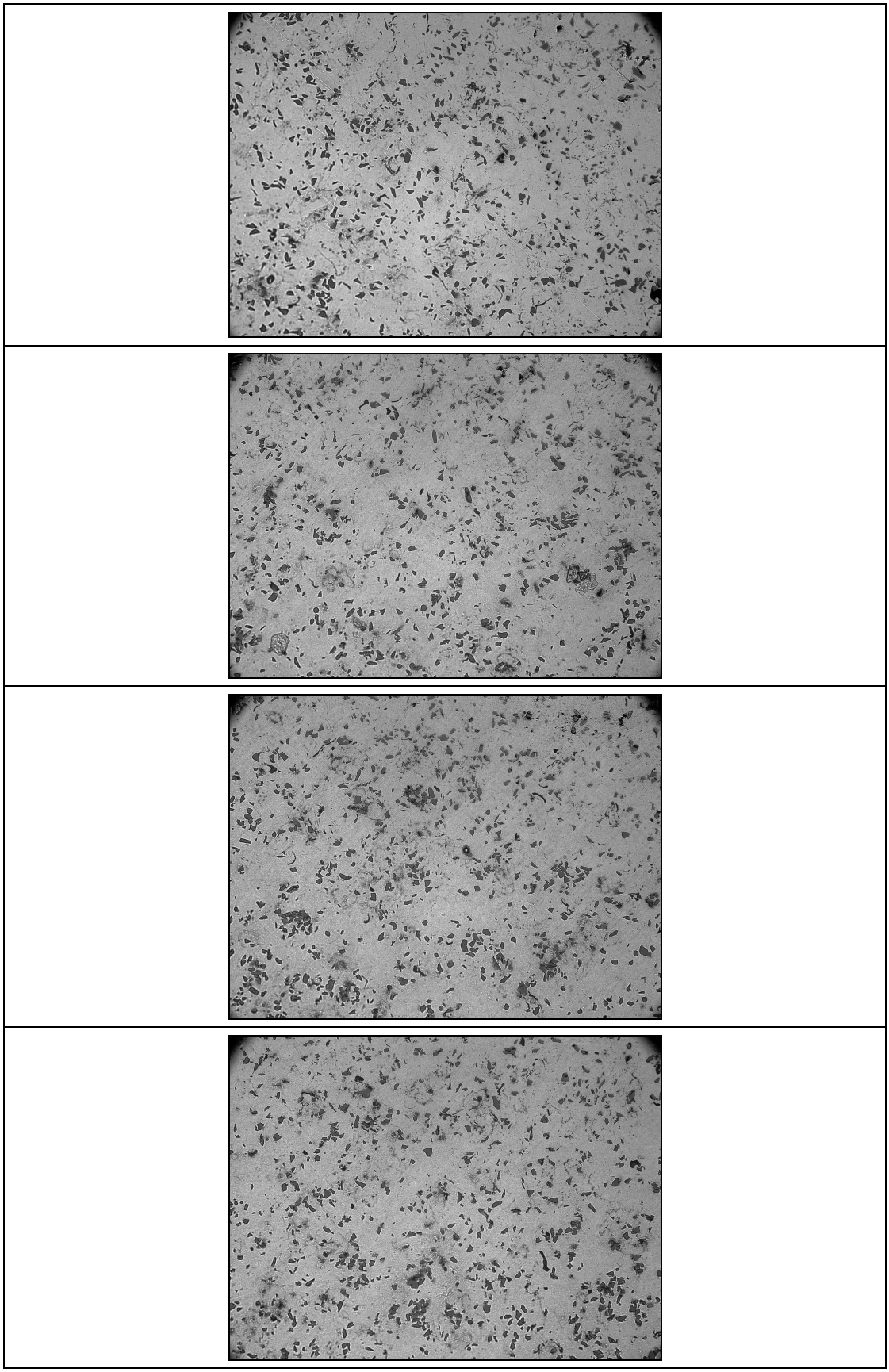
Şekil A.5: ND5 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200).



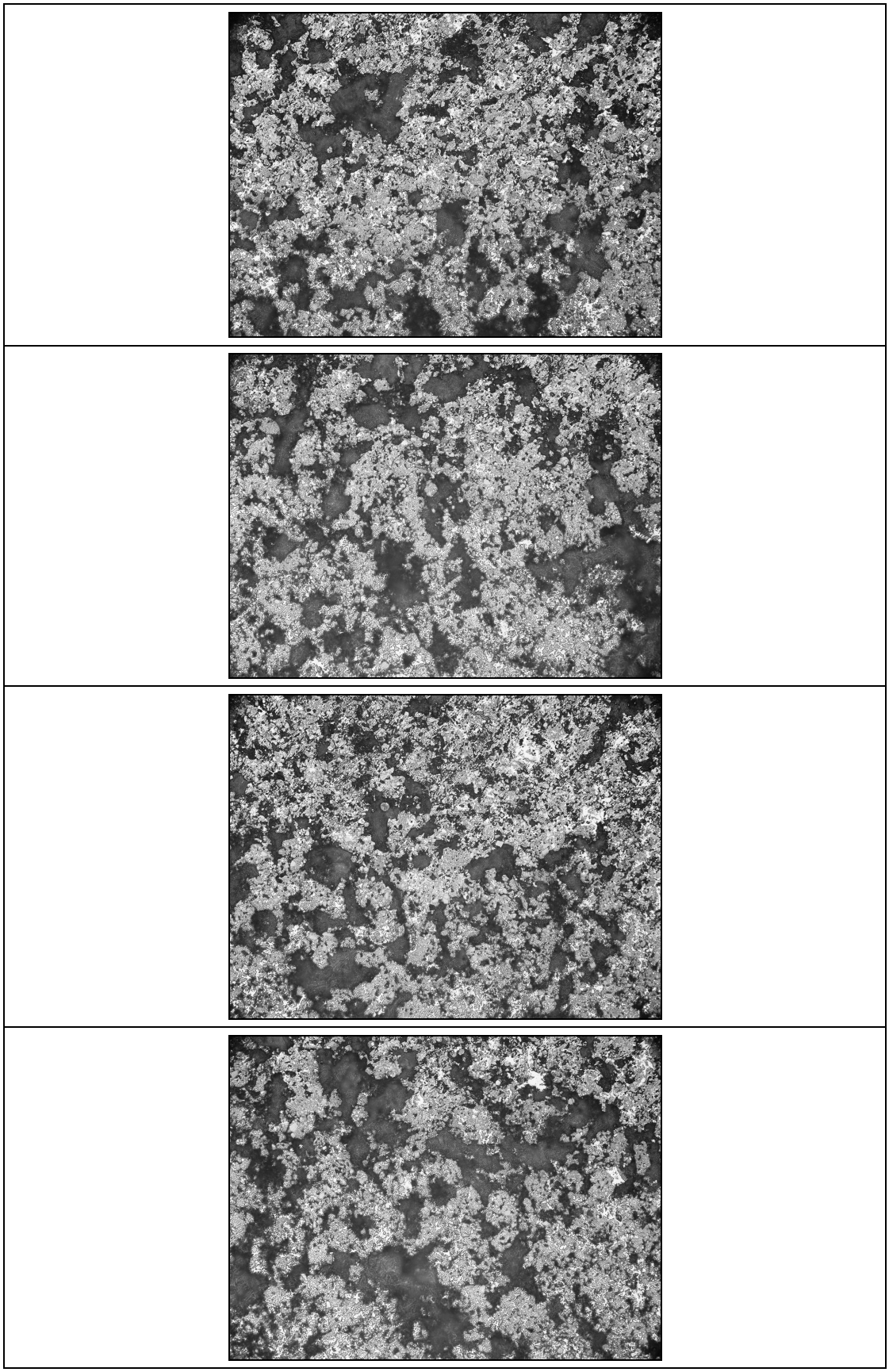
Şekil A.6: ND6 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200).



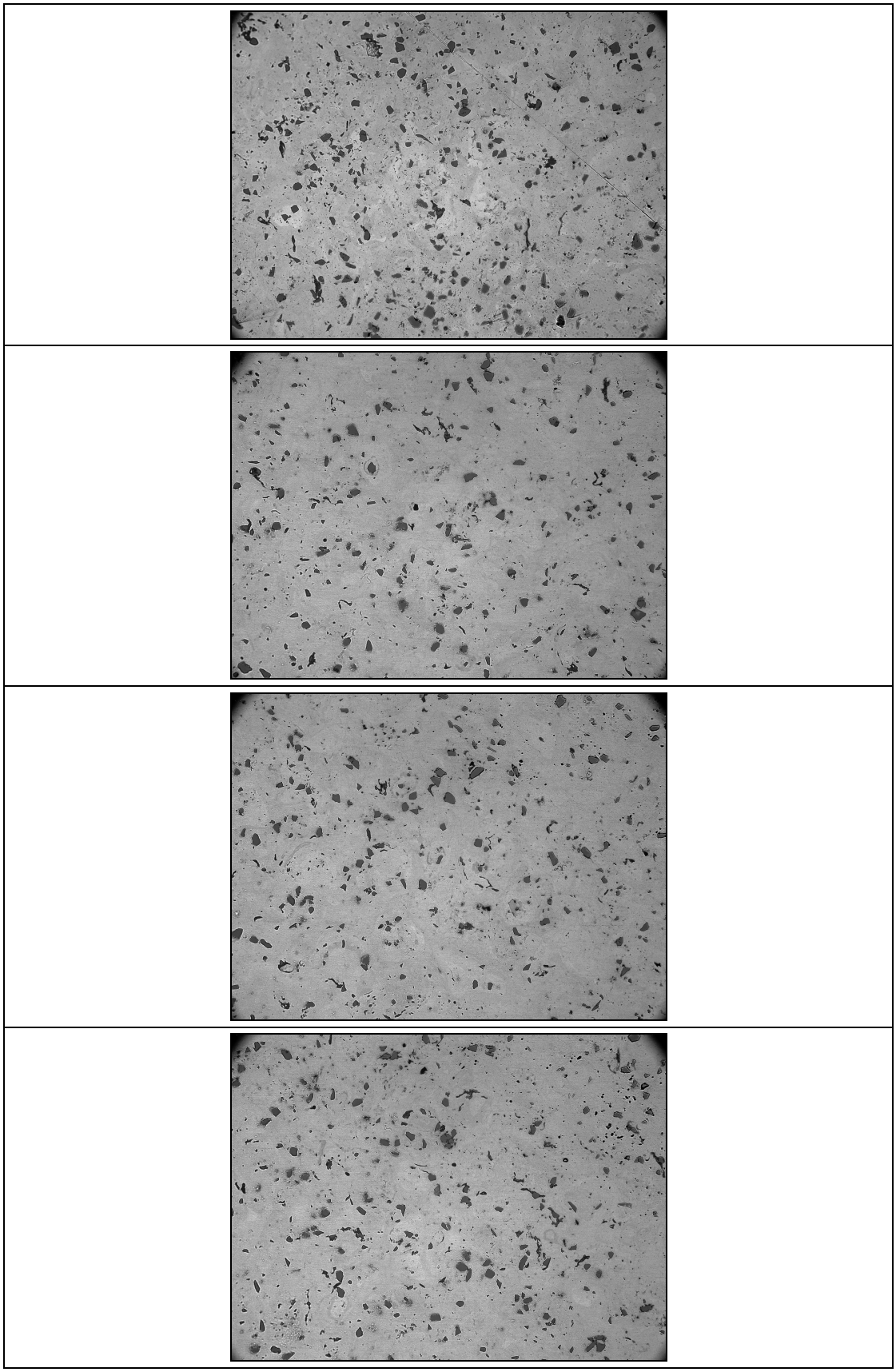
Şekil A.7: ND7 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200).



Şekil A.8: ND8 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200).

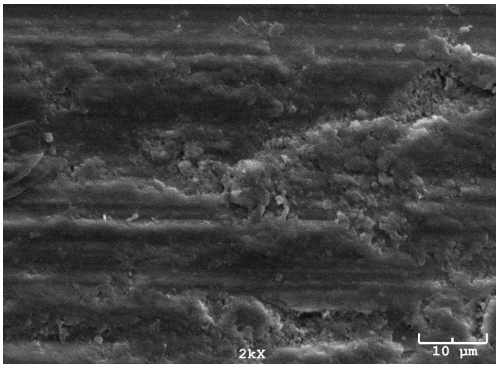
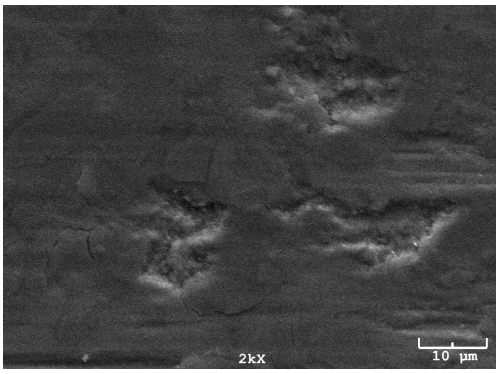
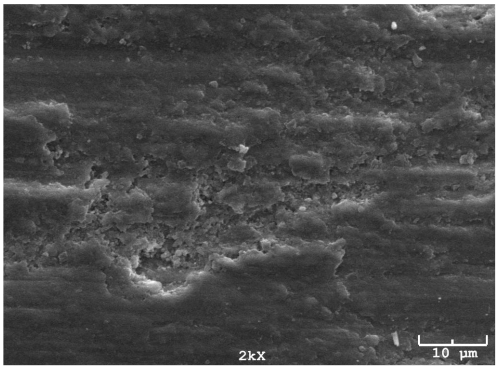
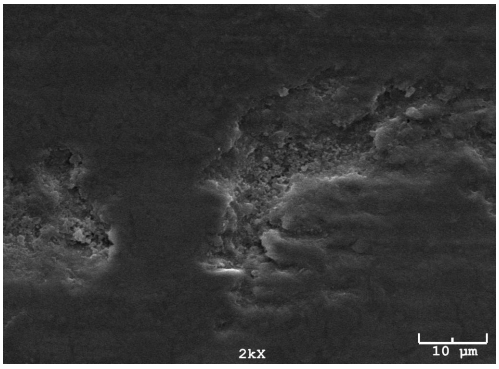
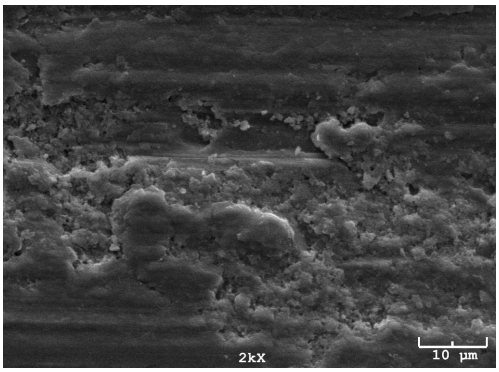
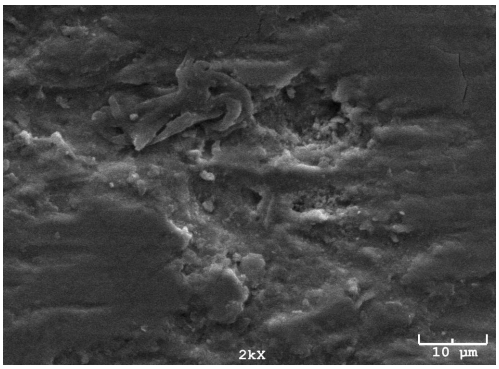
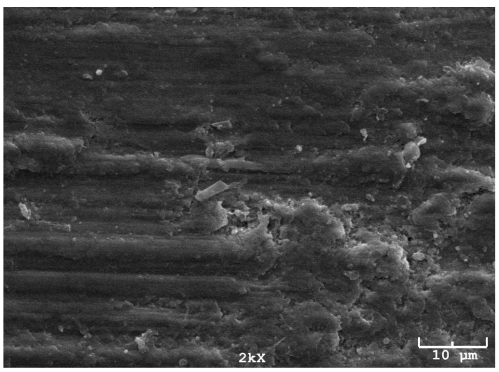
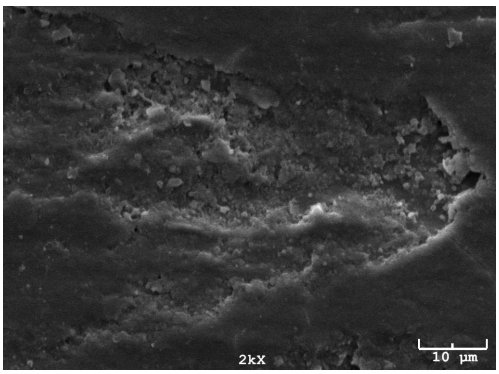


Şekil A.9: ND9 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200).

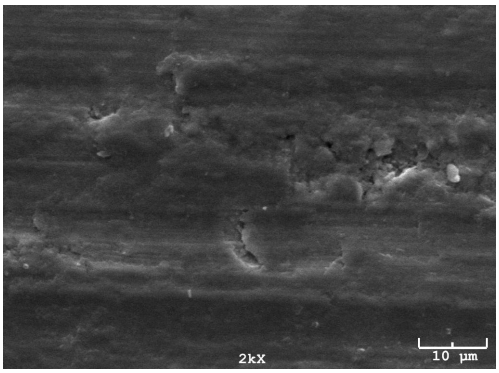
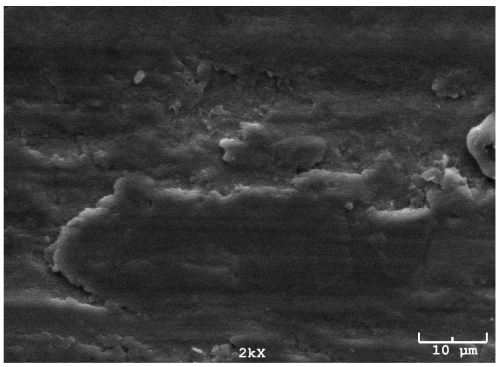
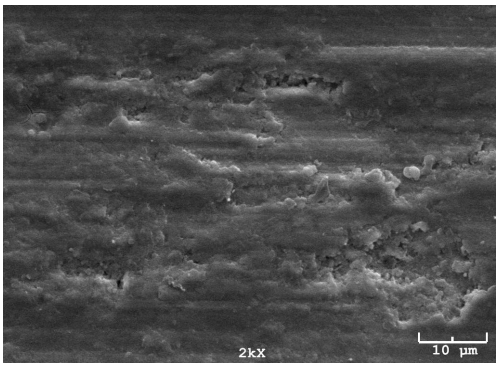
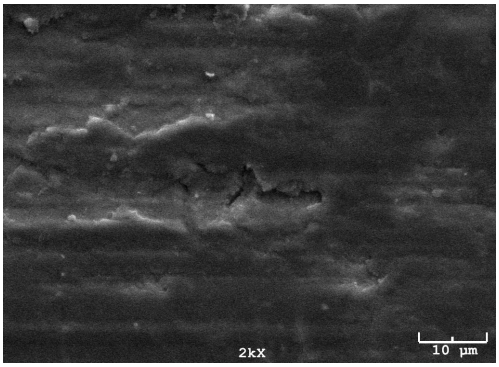
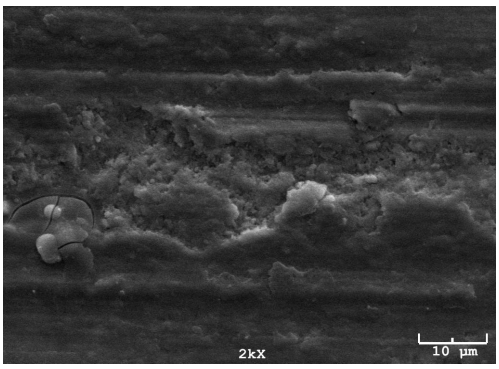
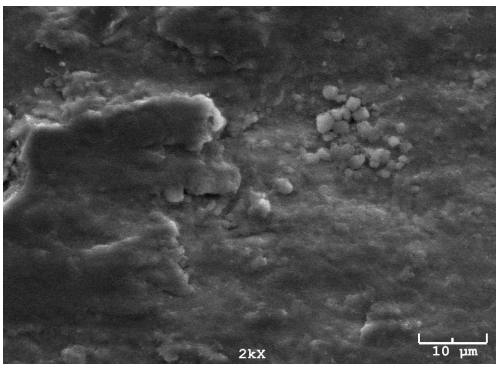
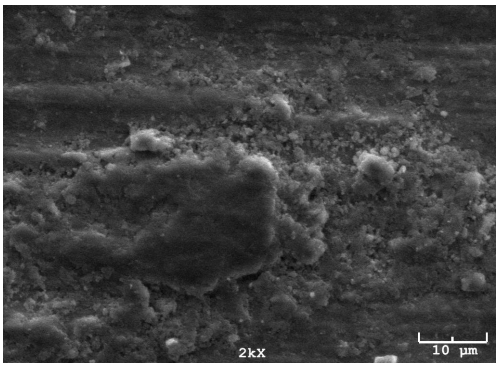
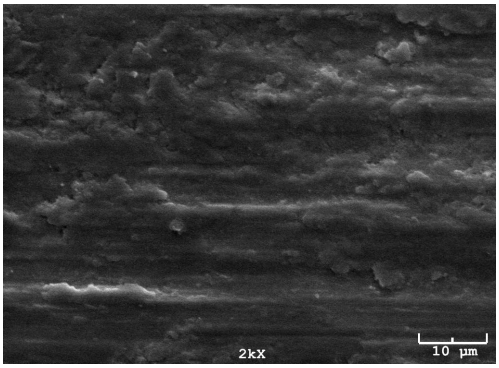


Şekil A.10: ND10 kodlu numune için faz analizi incelemesinde kullanılan 4 adet OM fotoğrafı (X200).

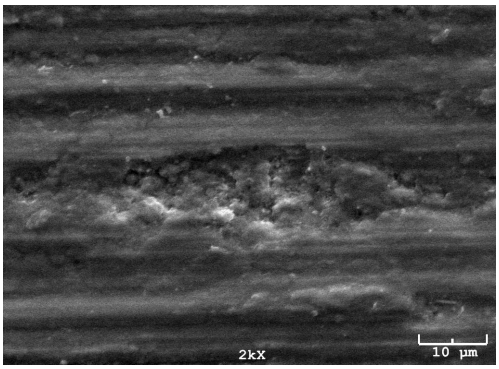
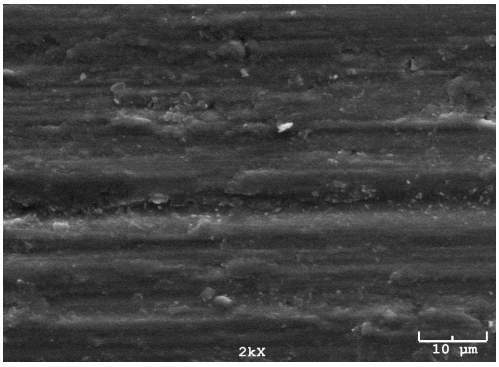
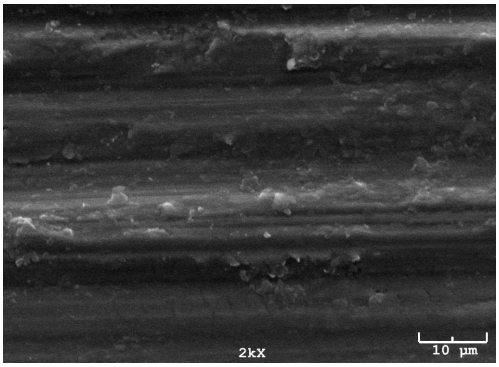
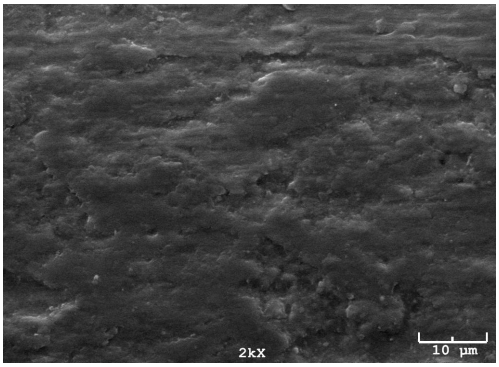
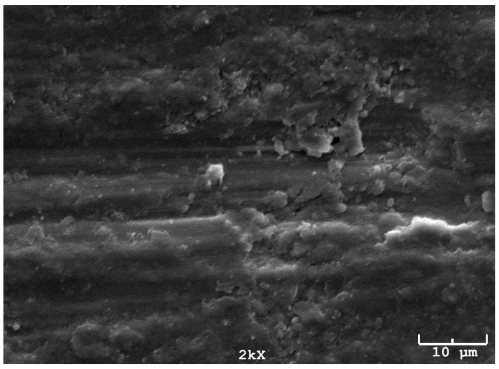
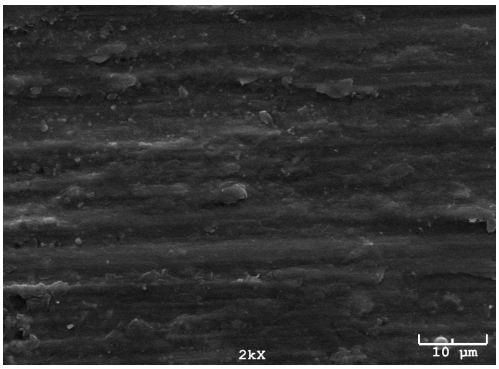
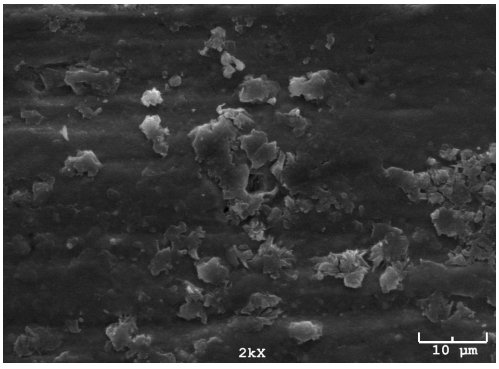
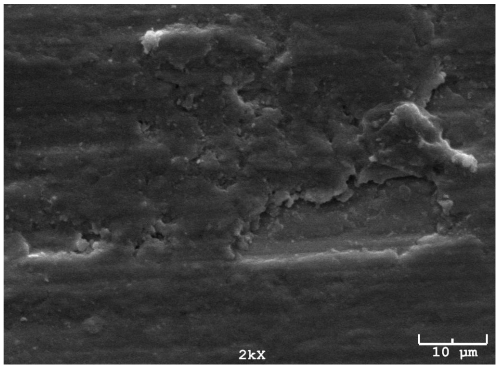
EK B

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

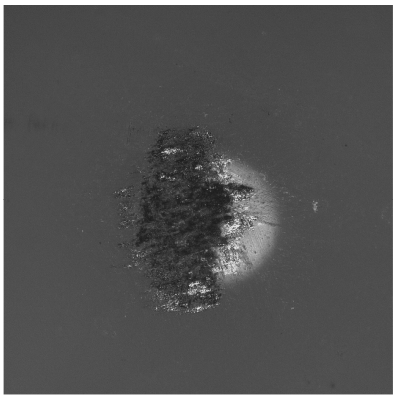
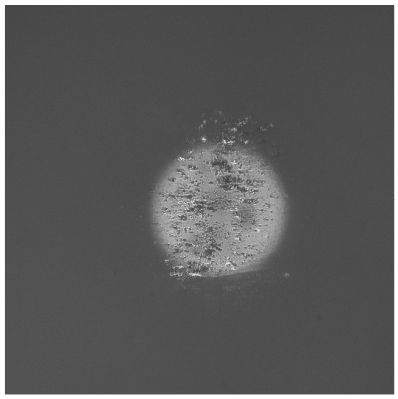
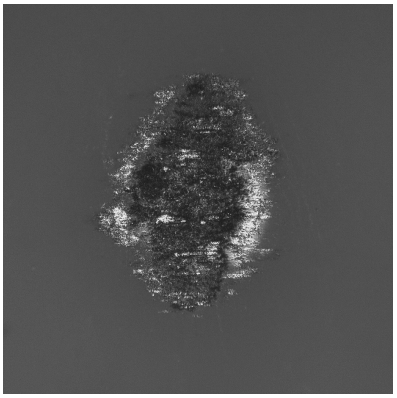
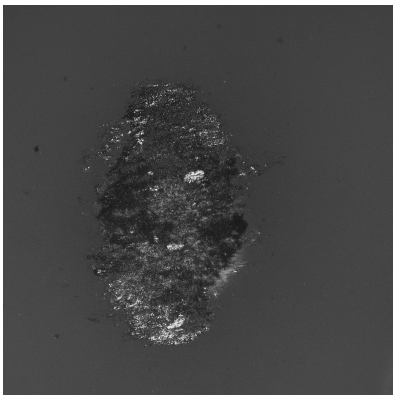
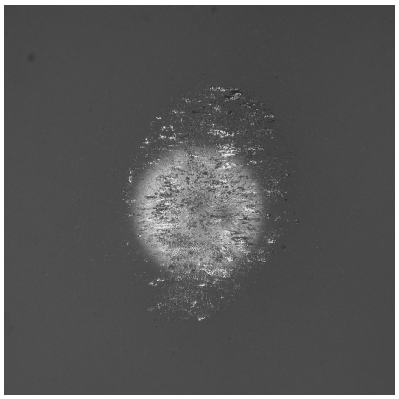
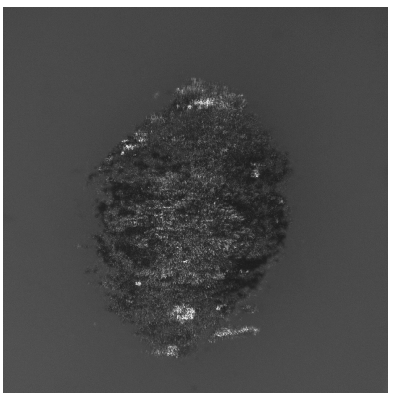
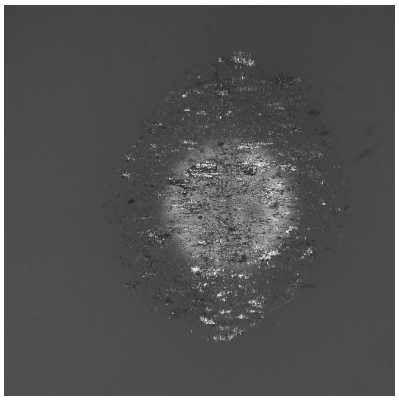
Şekil B.1: ND4 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri SEM görüntüleri.

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

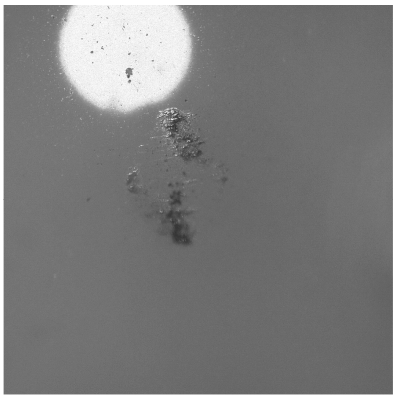
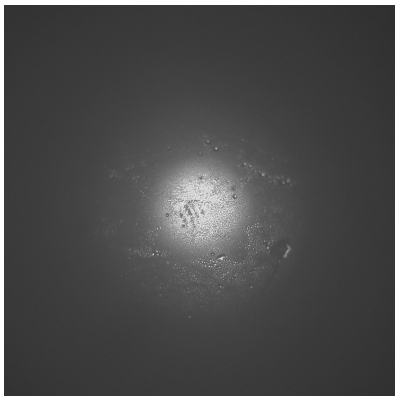
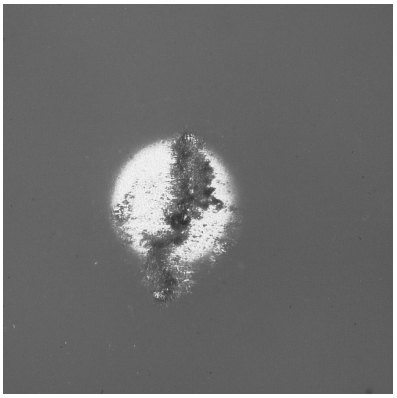
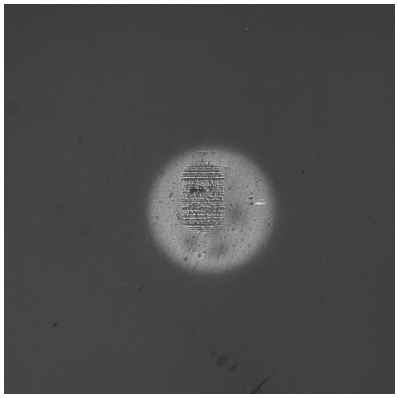
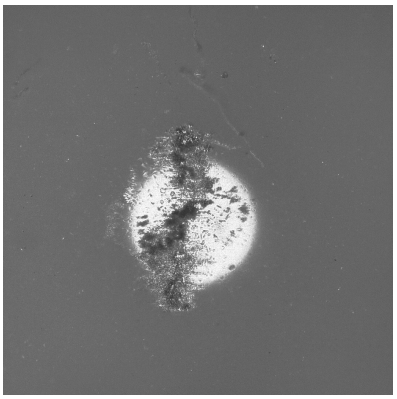
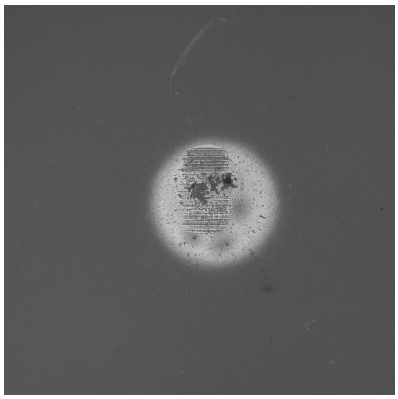
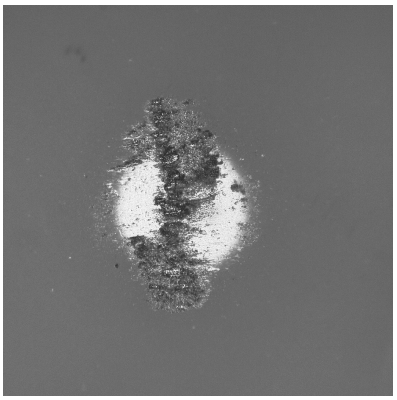
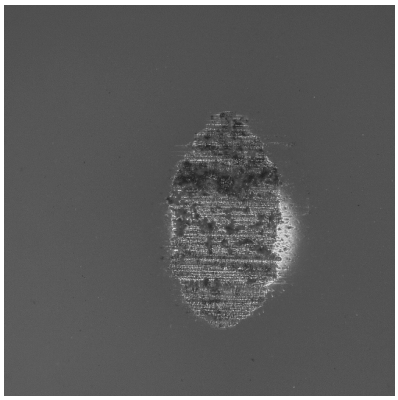
Şekil B.2: ND8 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri SEM görüntüleri.

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

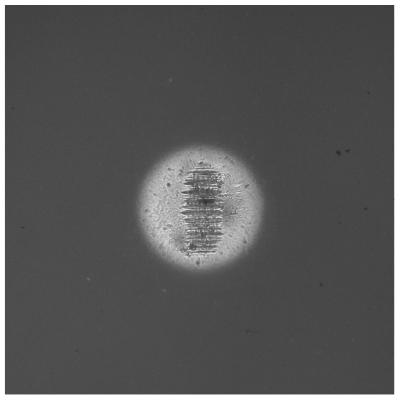
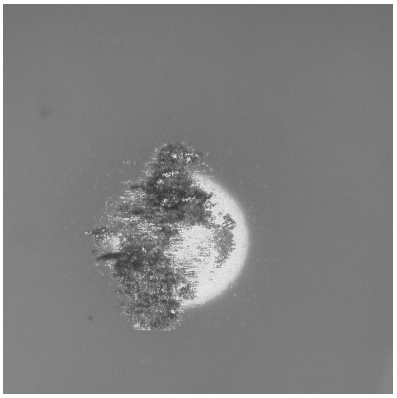
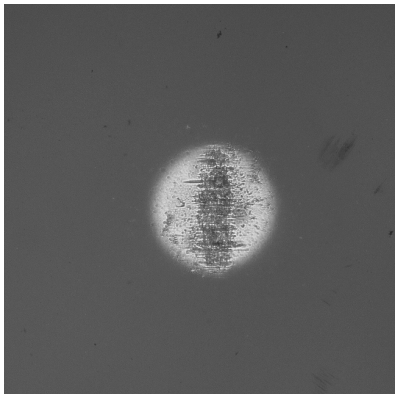
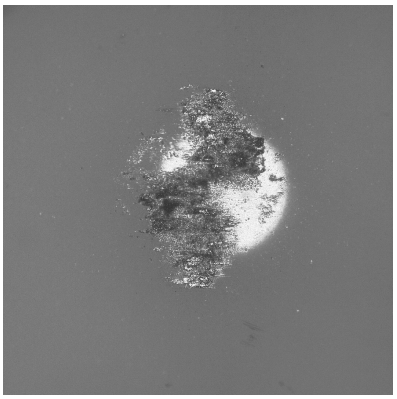
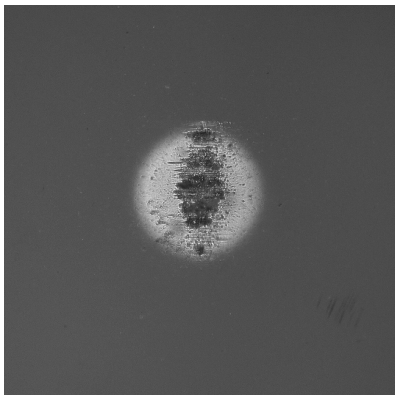
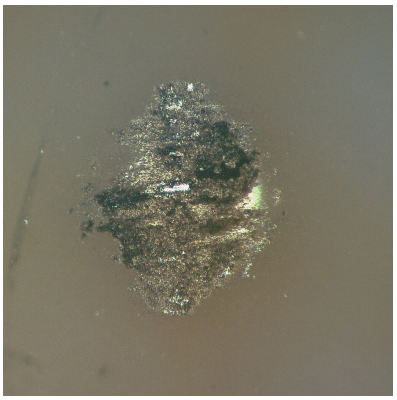
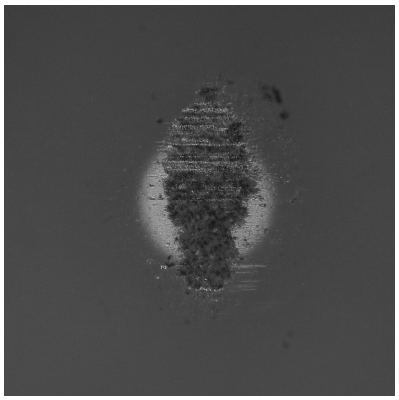
Şekil B.3: ND10 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri SEM görüntüleri.

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

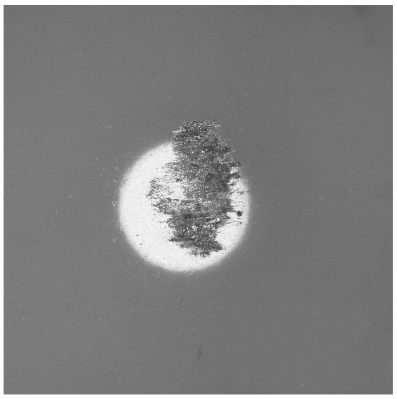
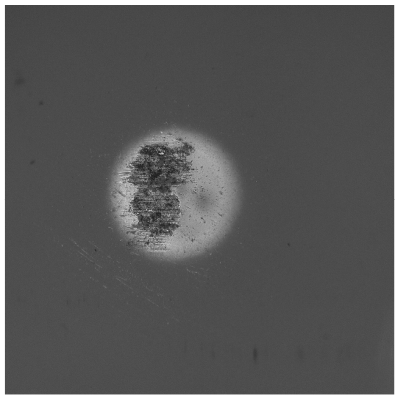
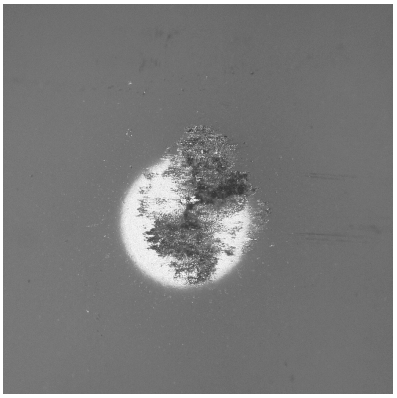
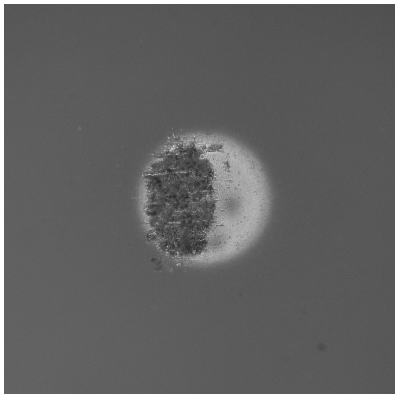
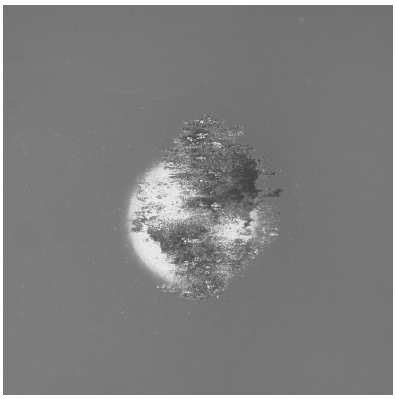
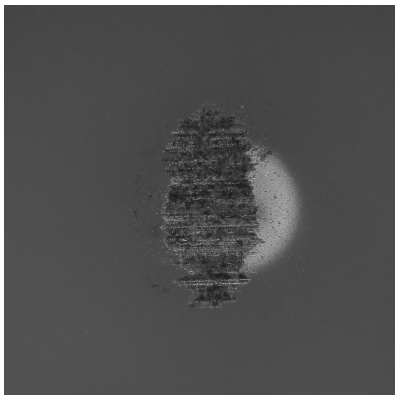
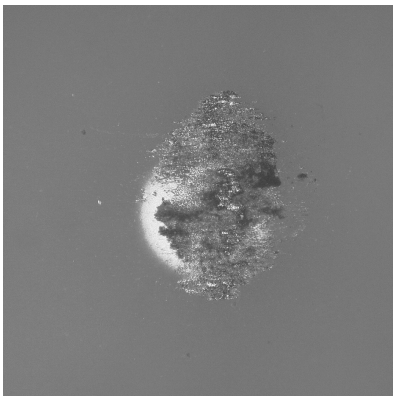
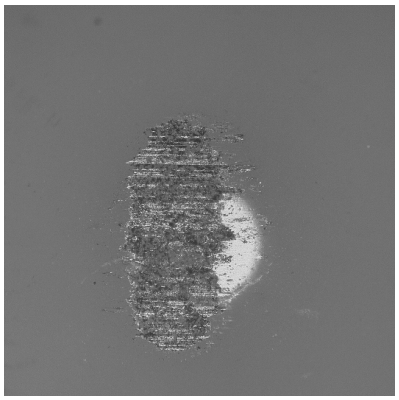
Şekil B.4: Alüminyum altlık aşınma deneyi için kullanılan Al_2O_3 karşı malzemenin 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma yüzeyleri OM görüntüleri (X50).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

Şekil B.5: ND4 kodlu numunenin aşınma deneyi için kullanılan Al_2O_3 karşı malzemenin 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma yüzeyleri OM görüntüleri (X50).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

Şekil B.6: ND8 kodlu numunenin aşınma deneyi için kullanılan Al_2O_3 karşı malzemenin 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma yüzeyleri OM görüntüleri (X50).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

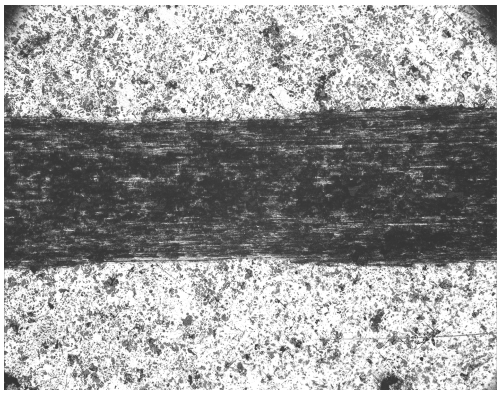
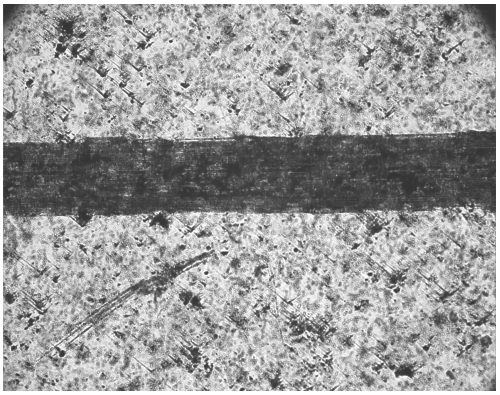
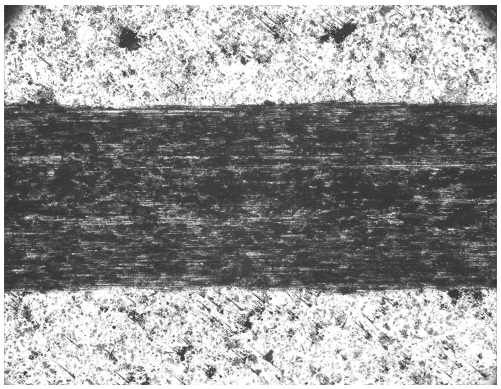
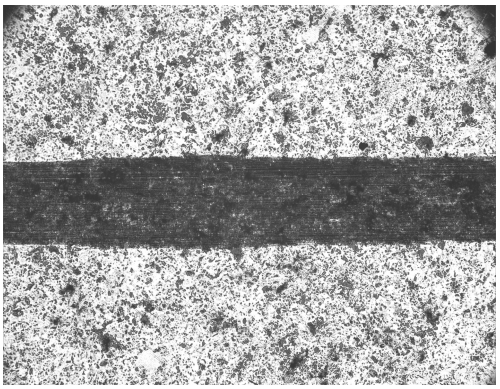
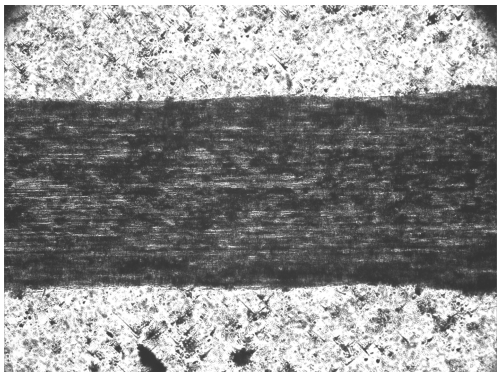
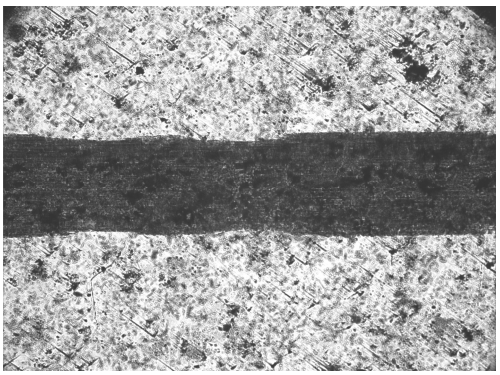
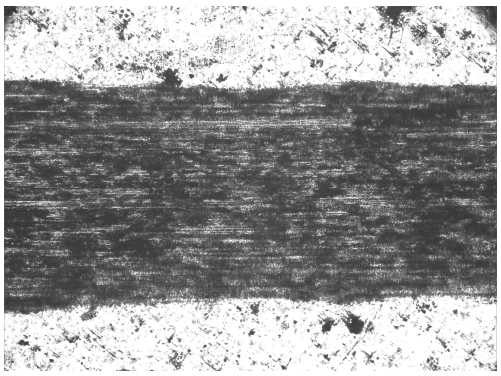
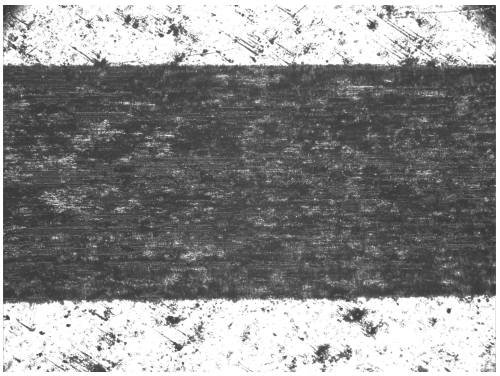
Şekil B.7: ND10 kodlu numunenin aşınma deneyi için kullanılan Al_2O_3 karşı malzemenin 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma yüzeyleri OM görüntüleri (X50).

Tablo B.1: Kuru ve sıvı ortam sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilya ile yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin ölçüm değerleri.

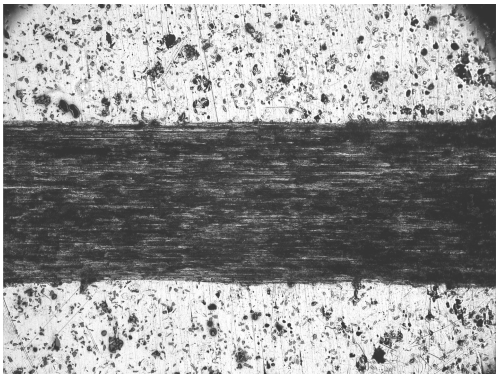
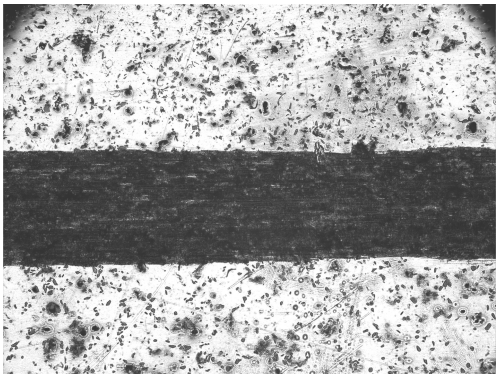
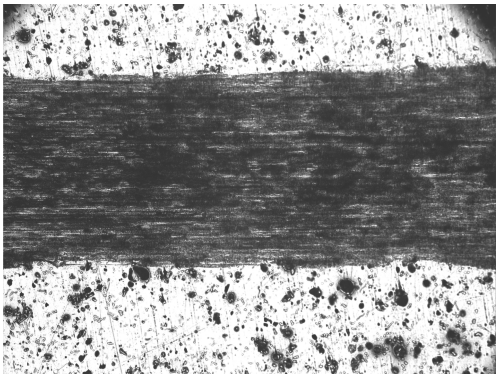
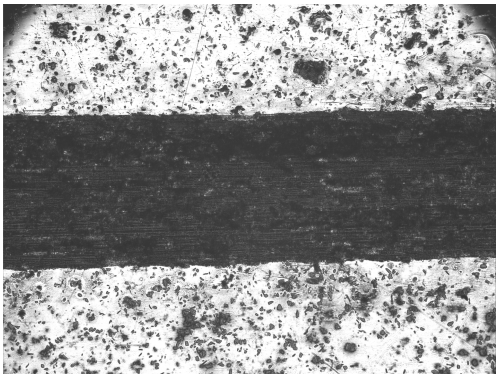
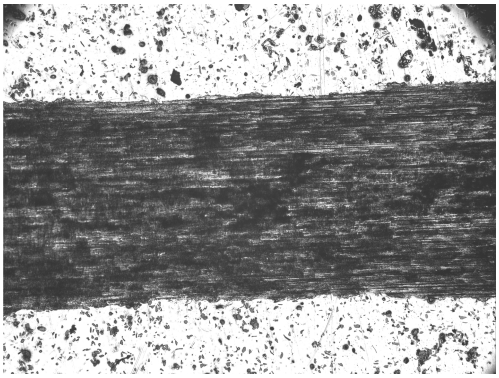
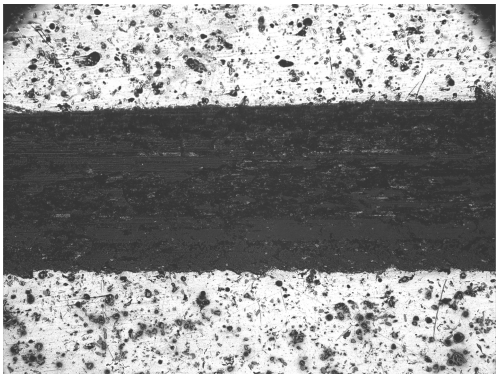
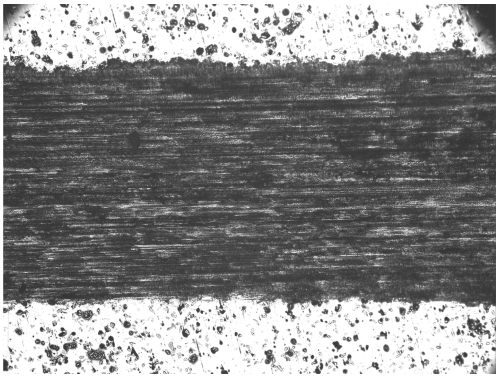
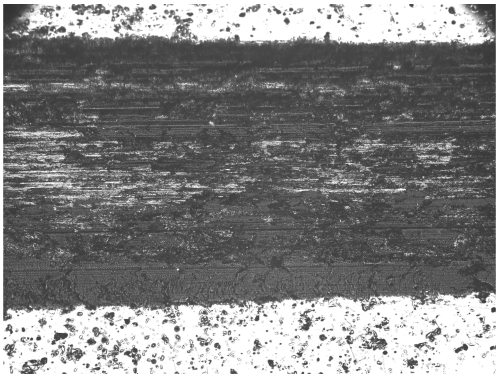
Kaplama Kodu	Deney Yükü (N)	1. Ölçüm (µm)		2. Ölçüm (µm)		3. Ölçüm (µm)		4. Ölçüm (µm)		Deney Ortamı
		derinlik	genişlik	derinlik	genişlik	derinlik	genişlik	derinlik	genişlik	
2014-T4	1N	14,05	698	17,69	599	8,89	612	12,60	686	Kuru
		9,92	635	13,86	528	9,04	625	13,09	632	Sıvı
	2N	19,41	827	23,88	861	22,36	834	28,00	854	Kuru
		13,46	698	17,19	693	11,26	703	15,14	689	Sıvı
	3N	26,12	973	29,36	995	30,88	987	28,05	997	Kuru
		17,46	847	21,80	863	17,59	851	21,59	859	Sıvı
	5N	29,41	1049	34,84	1031	32,58	1026	38,31	1054	Kuru
		27,33	999	33,01	984	28,03	978	33,32	992	Sıvı
ND4	1N	9,95	501	10,52	510	11,09	519	10,01	503	Kuru
		0,67	199	1,21	184	0,59	221	1,05	191	Sıvı
	2N	16,64	648	15,93	631	19,39	666	16,78	627	Kuru
		2,68	236	4,08	252	0,97	244	1,99	241	Sıvı
	3N	20,23	691	17,57	645	23,21	700	17,12	666	Kuru
		1,37	345	2,20	309	2,15	320	3,27	335	Sıvı
	5N	23,28	762	22,12	751	26,10	774	24,04	751	Kuru
		17,82	822	19,92	806	19,27	812	16,58	818	Sıvı
ND8	1N	12,16	558	12,51	556	14,51	572	12,75	563	Kuru
		4,90	396	4,62	380	4,51	392	4,21	386	Sıvı
	2N	19,94	698	17,41	650	20,69	703	17,31	664	Kuru
		9,27	530	8,94	517	8,74	516	8,56	532	Sıvı
	3N	22,59	714	19,34	684	23,54	735	20,88	700	Kuru
		11,83	556	11,50	586	11,45	570	11,12	574	Sıvı
	5N	26,65	822	27,31	813	34,47	859	27,06	792	Kuru
		29,75	898	29,09	920	27,19	914	26,61	924	Sıvı
ND10	1N	9,12	501	9,08	453	10,10	495	9,06	462	Kuru
		8,40	509	8,01	489	7,40	505	7,32	501	Sıvı
	2N	12,28	565	14,40	579	13,40	587	13,76	567	Kuru
		9,96	537	9,51	520	9,34	540	9,47	539	Sıvı
	3N	19,52	677	15,37	634	17,05	655	17,43	648	Kuru
		19,88	765	20,73	785	20,10	771	19,47	777	Sıvı
	5N	25,70	794	22,60	760	23,15	770	25,50	784	Kuru
		30,52	905	28,85	896	28,95	902	29,15	898	Sıvı

Tablo B.2: Kuru ve sıvı ortam sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilya ile yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin ortalama boyutları ve hacmi.

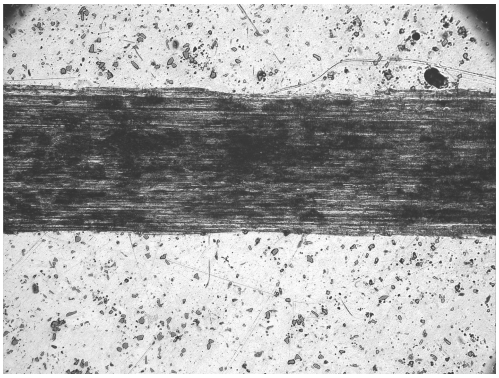
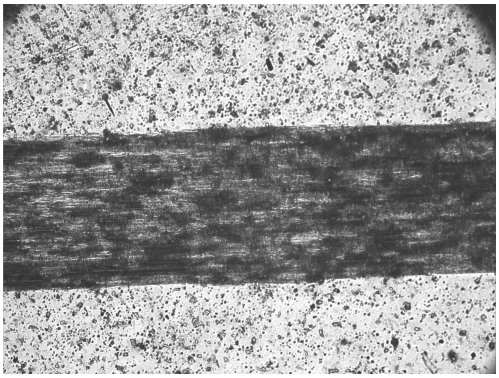
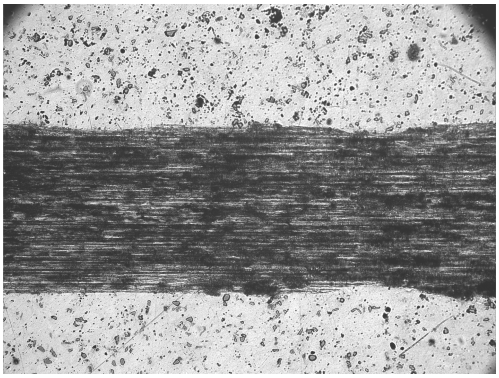
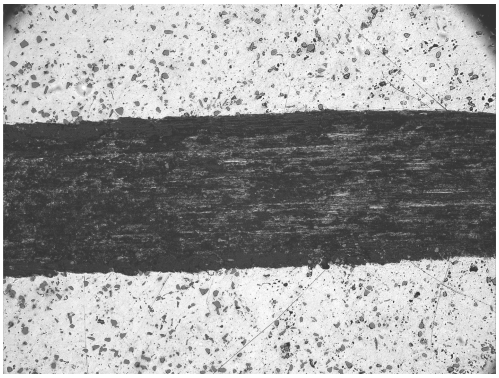
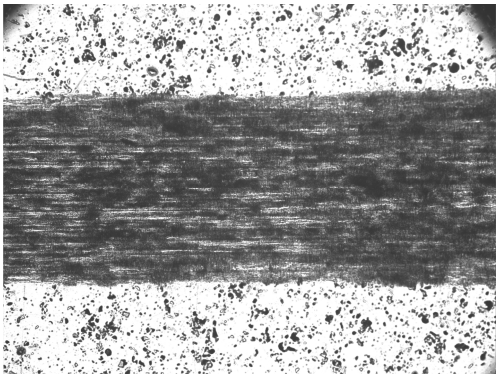
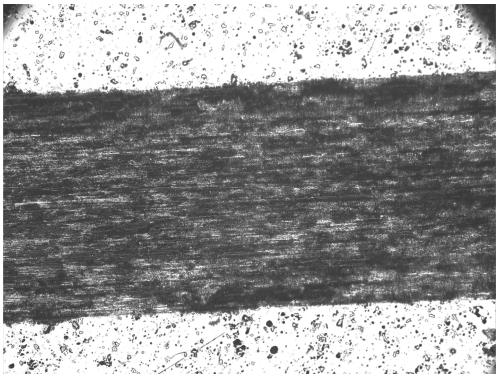
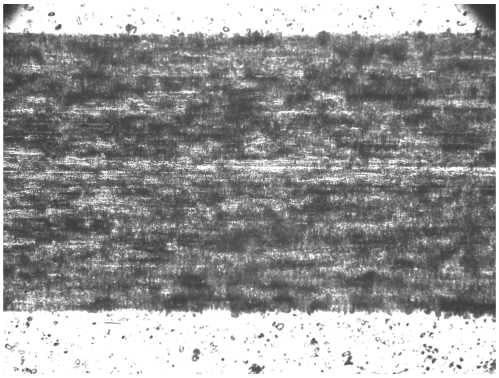
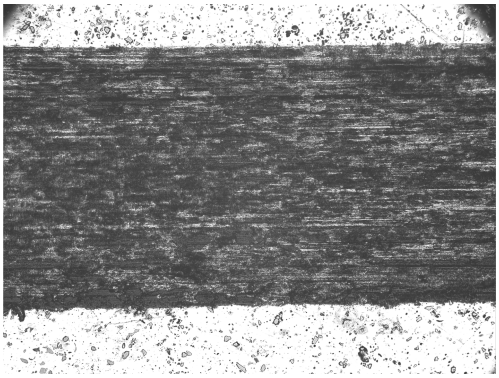
Kaplama Kodu	Deney Yükü (N)	Ortalama İz Genişliği (mm)x10^{-3}	Ortalama İz Derinliği (mm)x10^{-3}	Ortalama İz Hacmi (mm^3)x10^{-3}	Deney Ortamı
2014-T4	1N	648	13	33,080	Kuru
		630	11	27,214	Sıvı
	2N	844	23	76,230	Kuru
		696	15	40,997	Sıvı
	3N	987	28	108,526	Kuru
		855	19	63,793	Sıvı
	5N	1040	33	134,774	Kuru
		988	30	116,396	Sıvı
ND4	1N	508	11	21,944	Kuru
		198	0,8	0,622	Sıvı
	2N	627	16	39,395	Kuru
		284	2	2,710	Sıvı
	3N	675	19	50,363	Kuru
		327	2	2,876	Sıvı
	5N	759	23	68,553	Kuru
		814	18	58,784	Sıvı
ND8	1N	562	12	27,737	Kuru
		388	4	6,730	Sıvı
	2N	678	18	44,765	Kuru
		523	8	17,983	Sıvı
	3N	708	21	59,916	Kuru
		571	11	25,281	Sıvı
	5N	821	28	85,632	Kuru
		914	28	99,883	Sıvı
ND10	1N	478	9	18,936	Kuru
		501	7	16,589	Sıvı
	2N	574	13	28,868	Kuru
		534	9	20,545	Sıvı
	3N	653	17	47,683	Kuru
		774	20	61,781	Sıvı
	5N	777	24	73,754	Kuru
		900	29	105,111	Sıvı

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

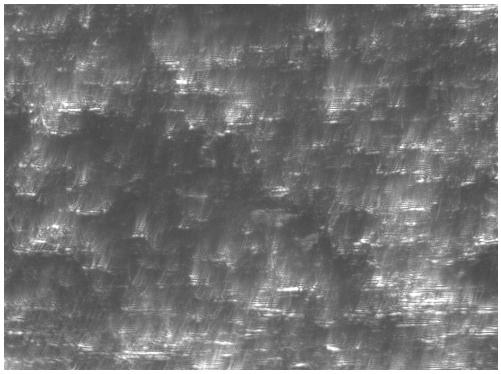
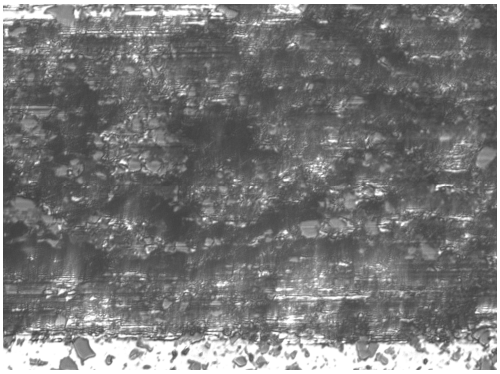
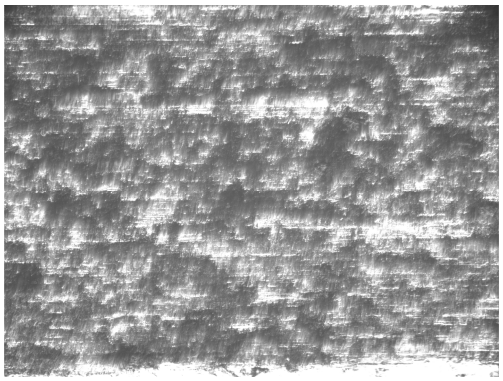
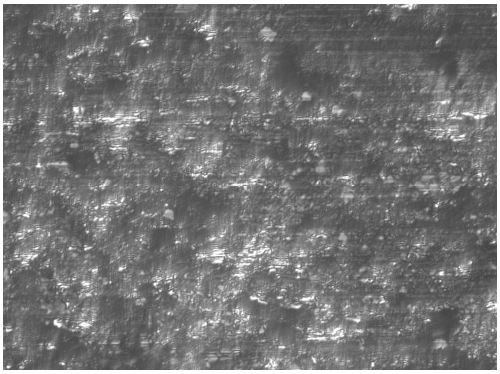
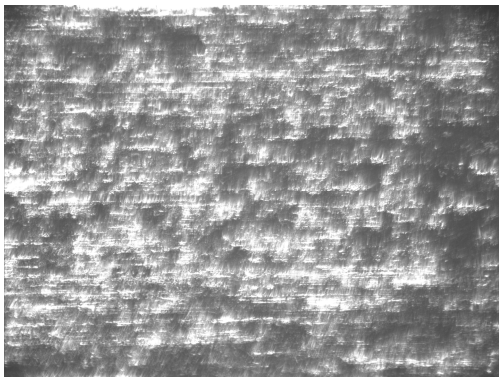
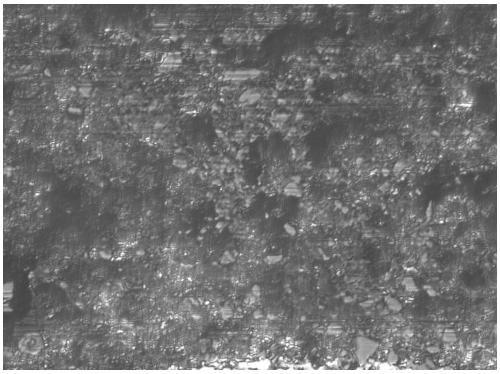
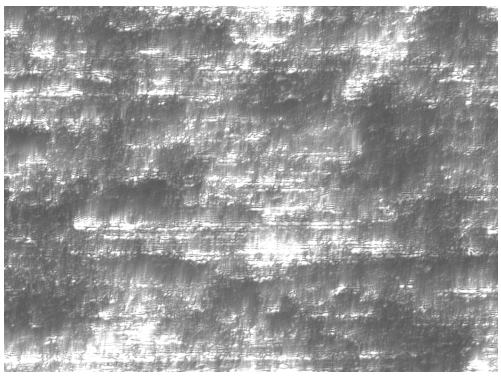
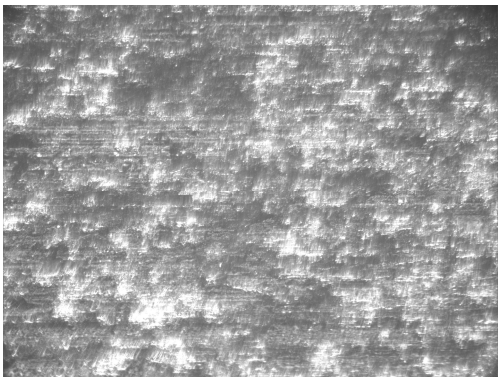
Şekil B.8: ND4 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X100).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

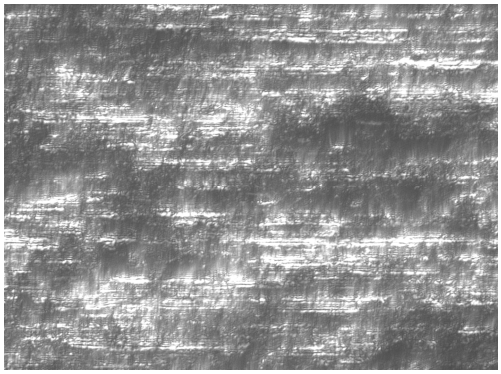
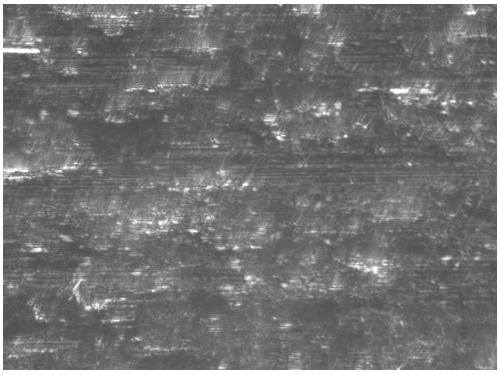
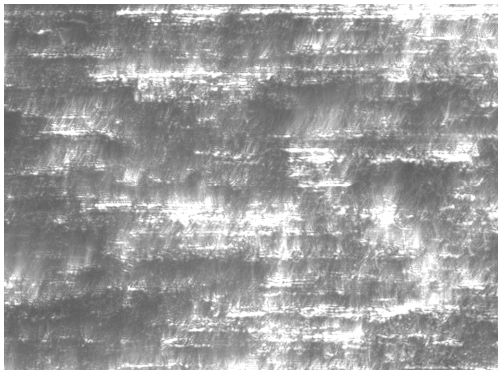
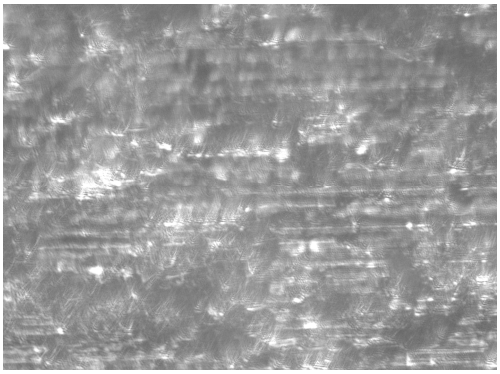
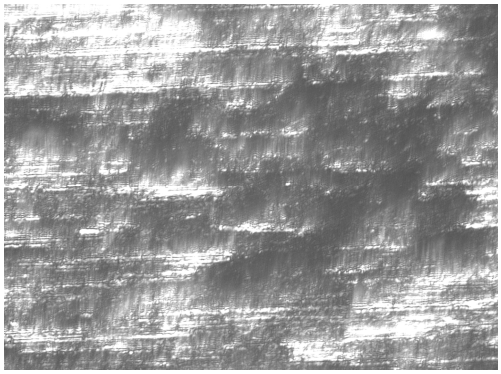
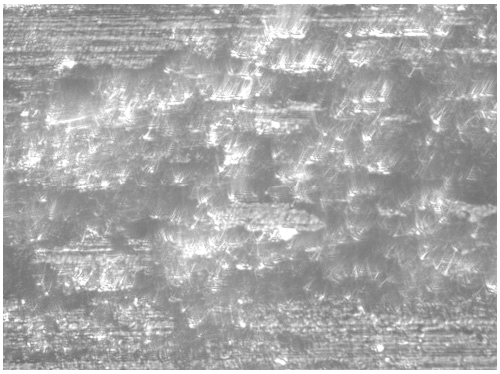
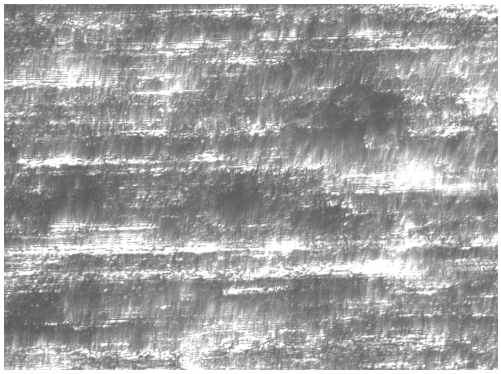
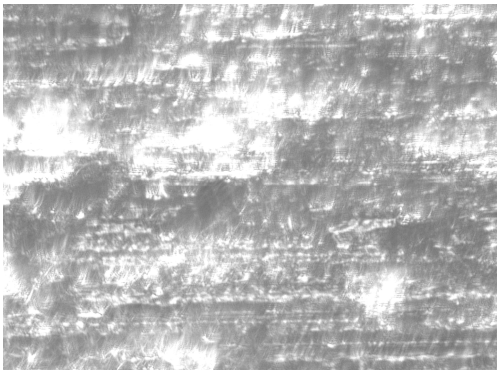
Şekil B.9: ND8 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X100).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

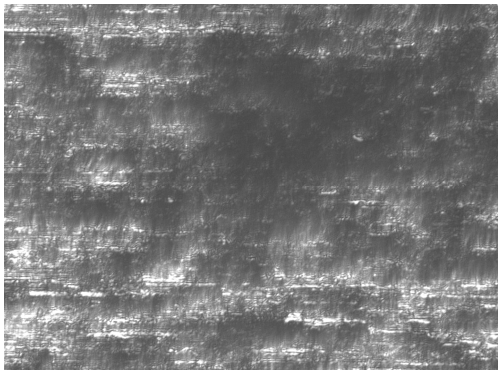
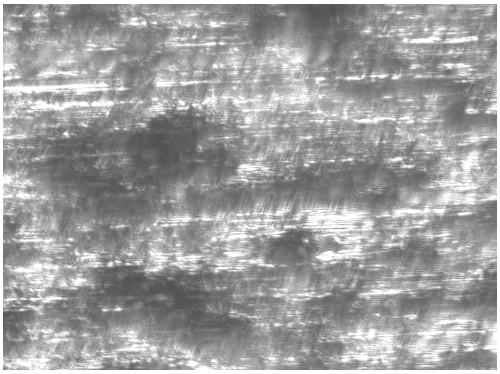
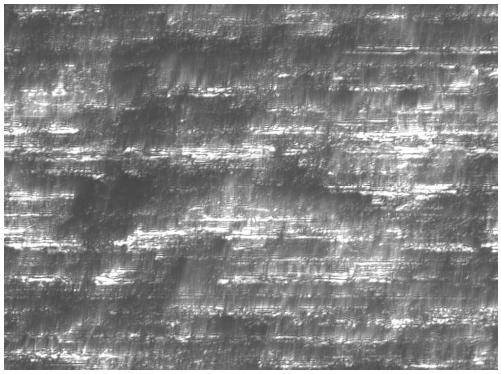
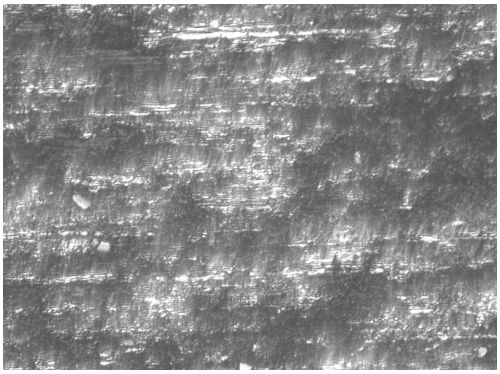
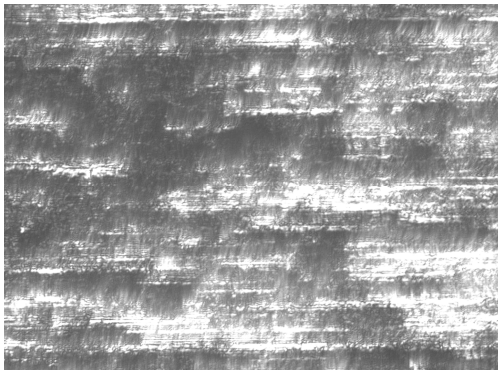
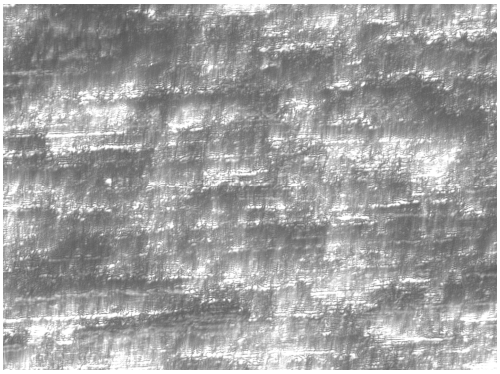
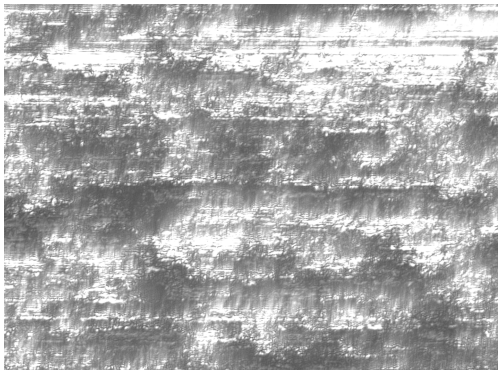
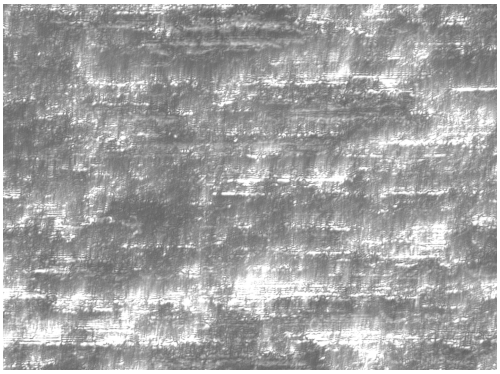
Şekil B.10: ND10 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X100).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

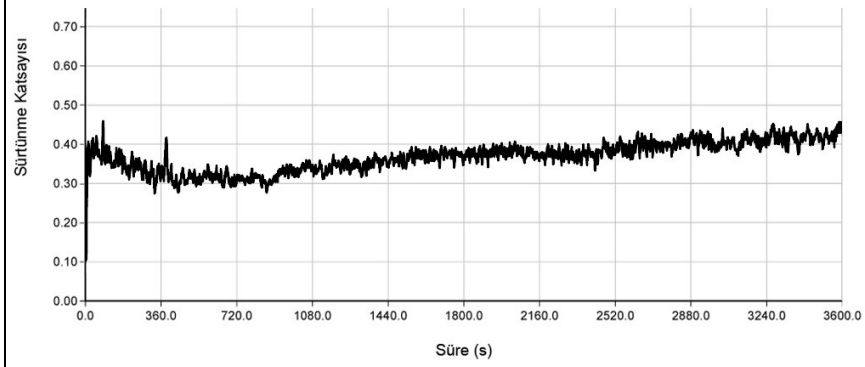
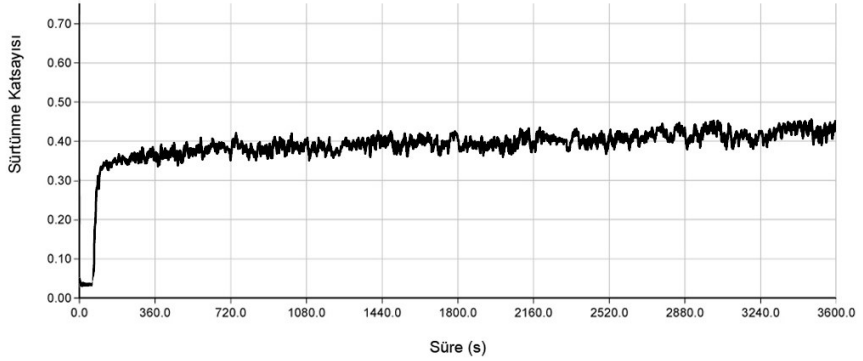
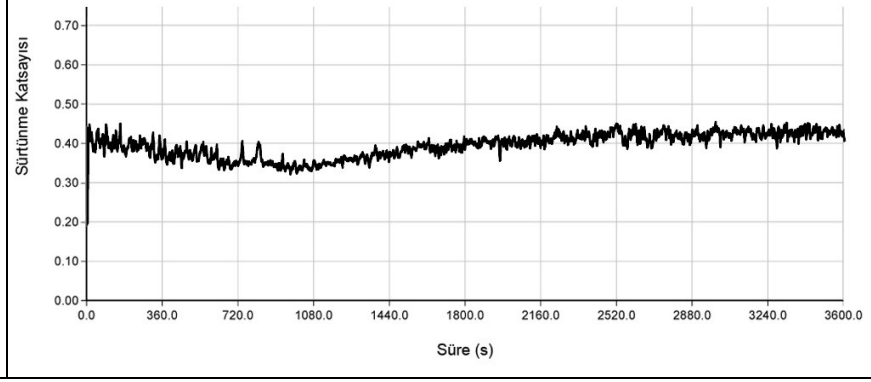
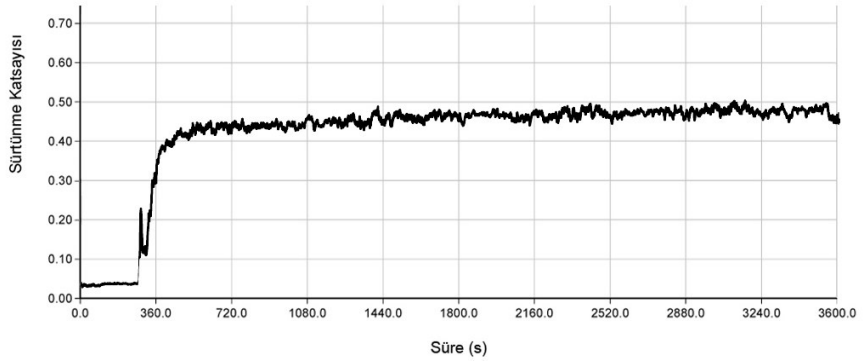
Şekil B.11: ND4 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X500).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

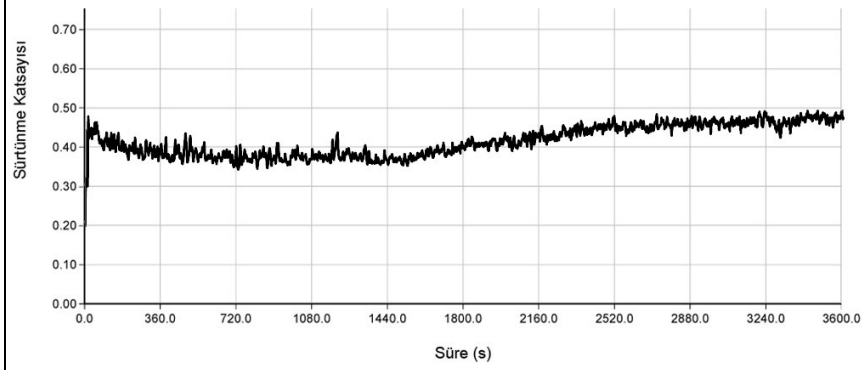
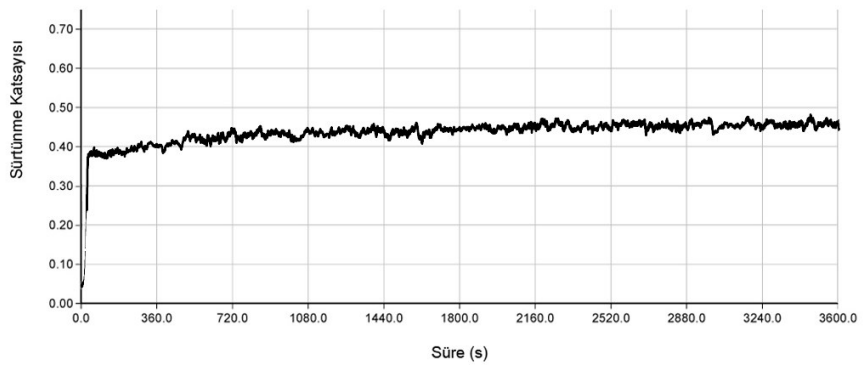
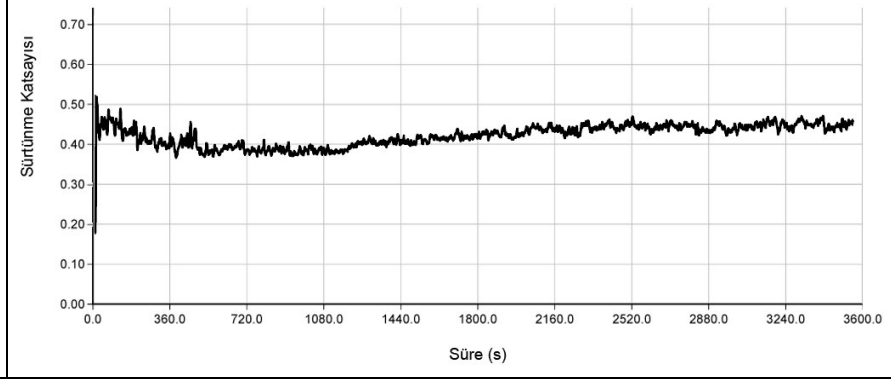
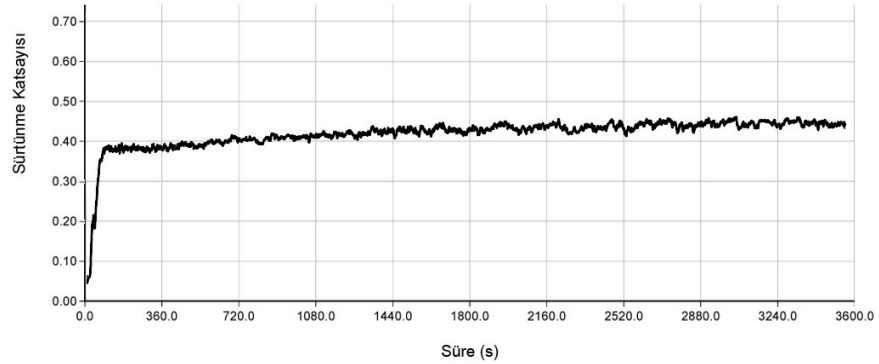
Şekil B.12: ND8 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X500).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		
3N		
5N		

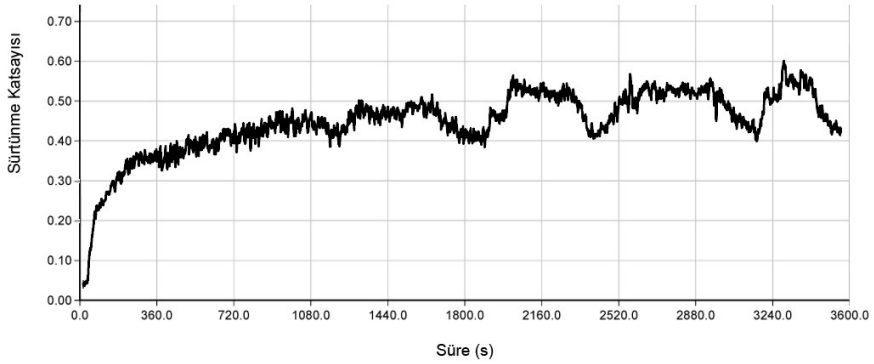
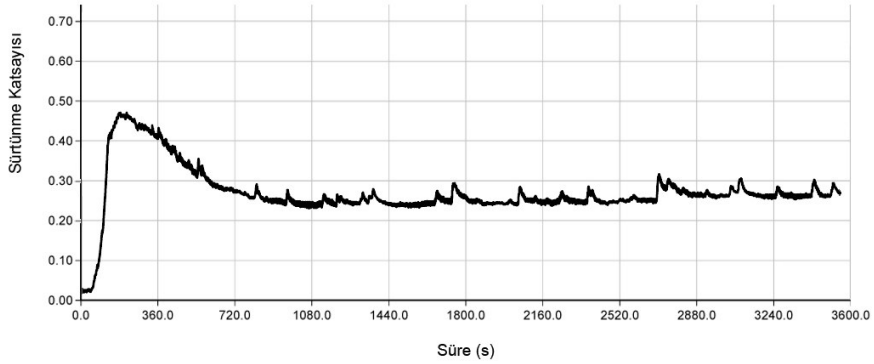
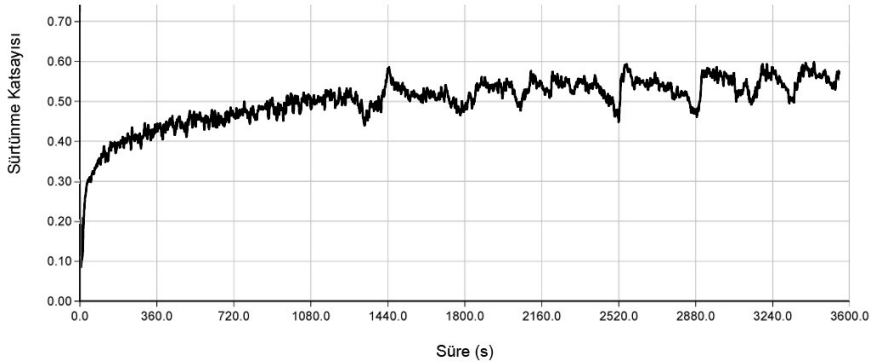
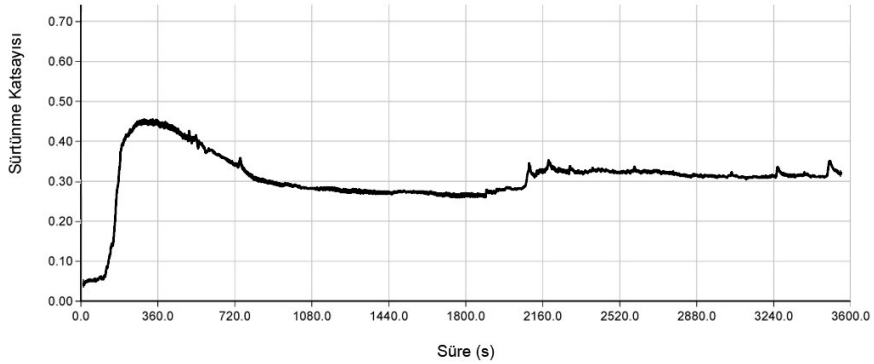
Şekil B.13: ND10 kodlu numune için 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında, kuru ve saf su ortamı aşınma izleri OM görüntüleri (X500).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		

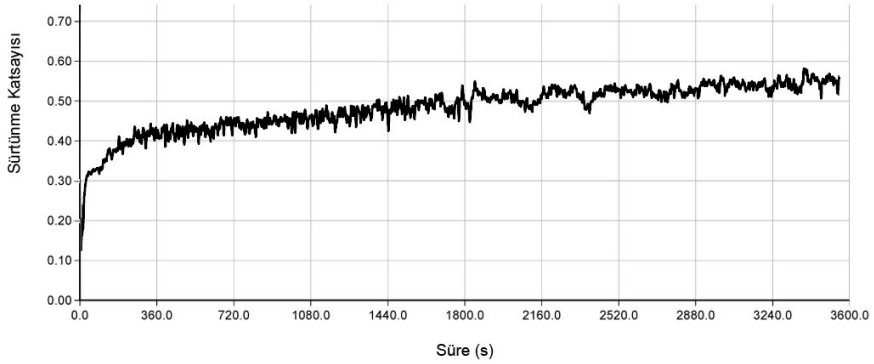
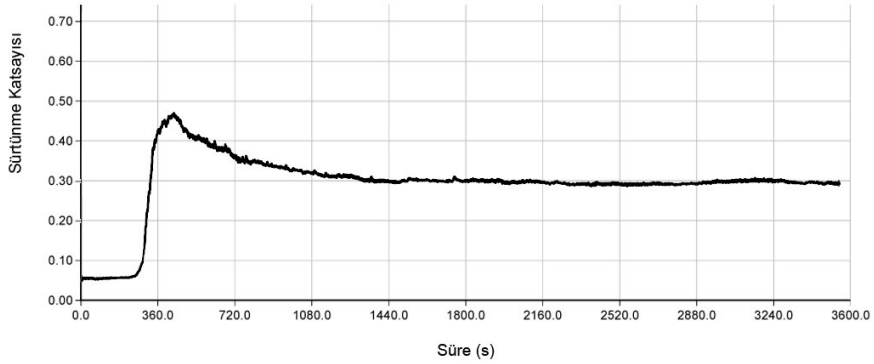
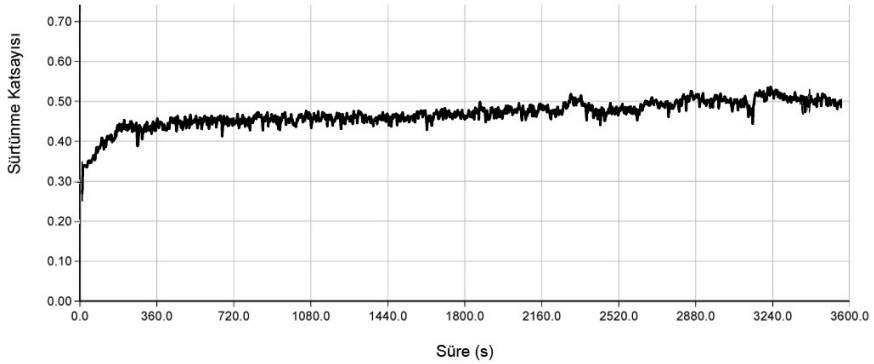
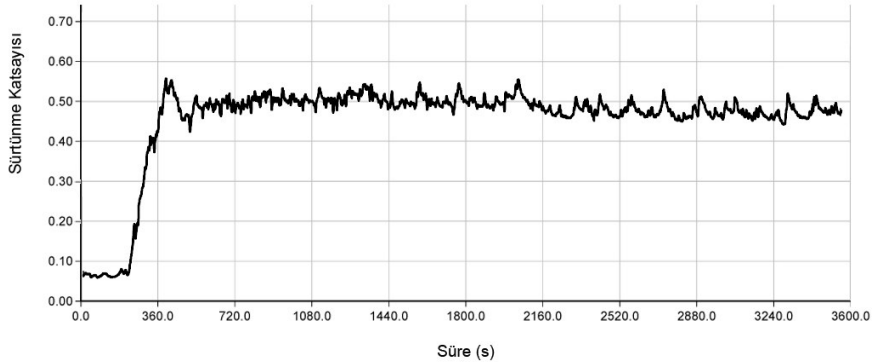
Şekil B.14: 2014-T4 alüminyum altlık için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi.

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
3N		
5N		

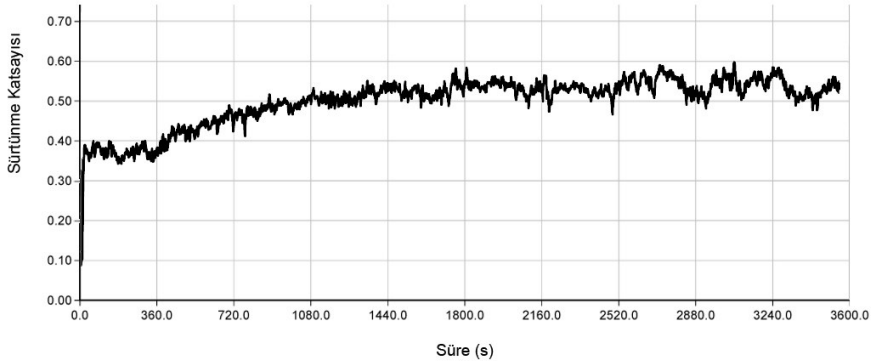
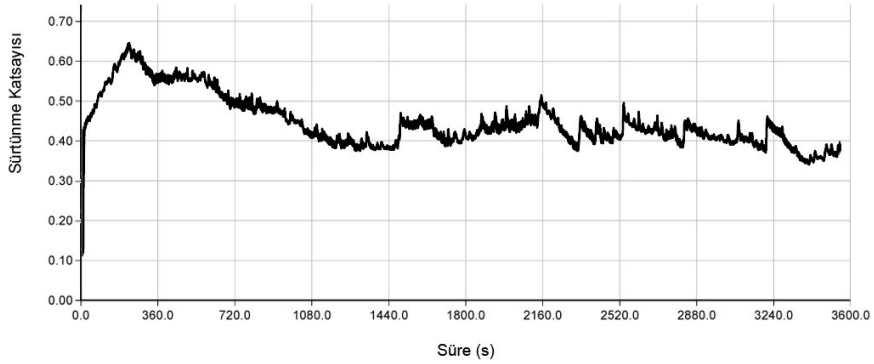
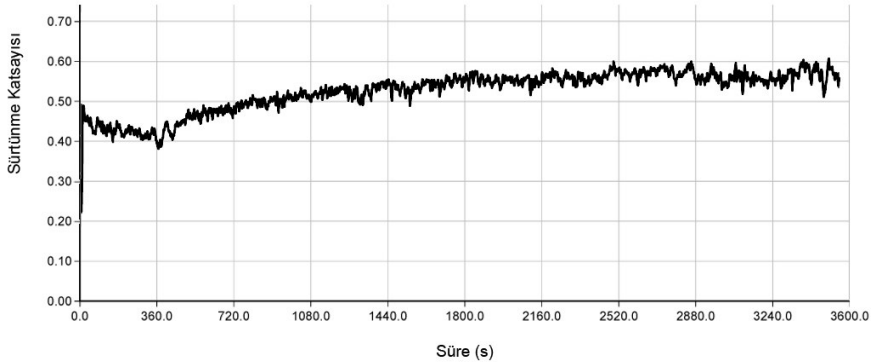
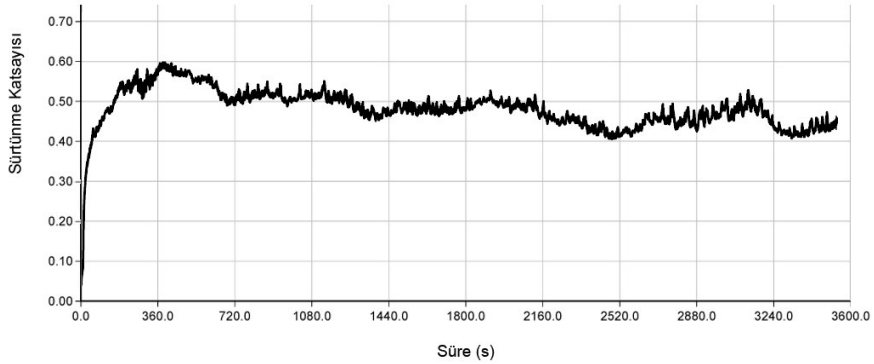
Şekil B.14: 2014-T4 alüminyum altlık için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi (Devam).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		

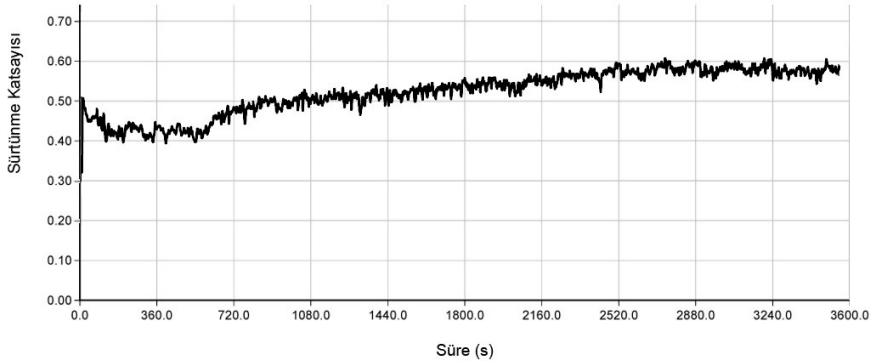
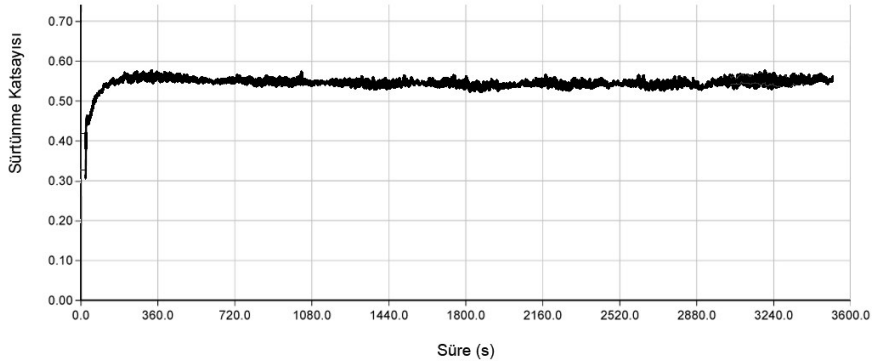
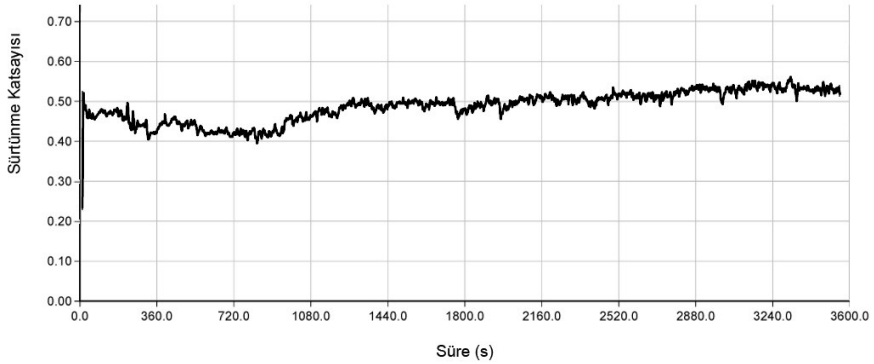
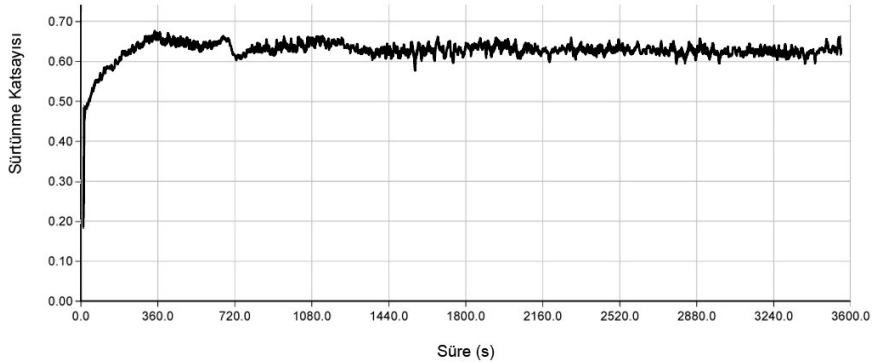
Şekil B.15: ND4 kodlu numune için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi.

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
3N		
5N		

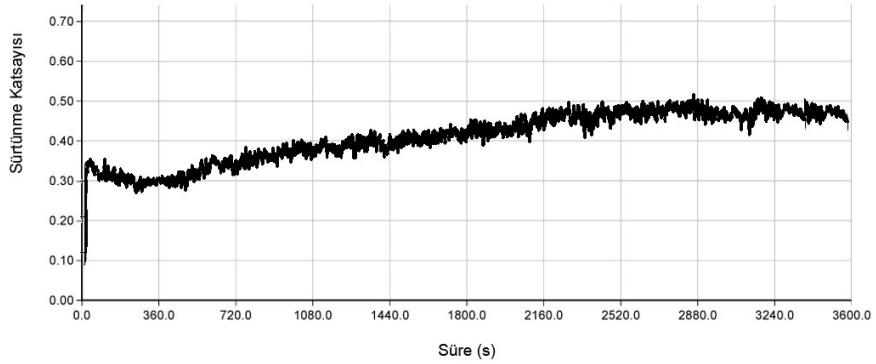
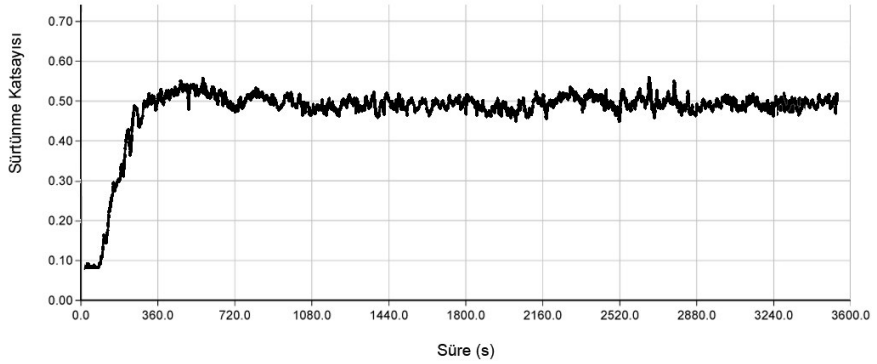
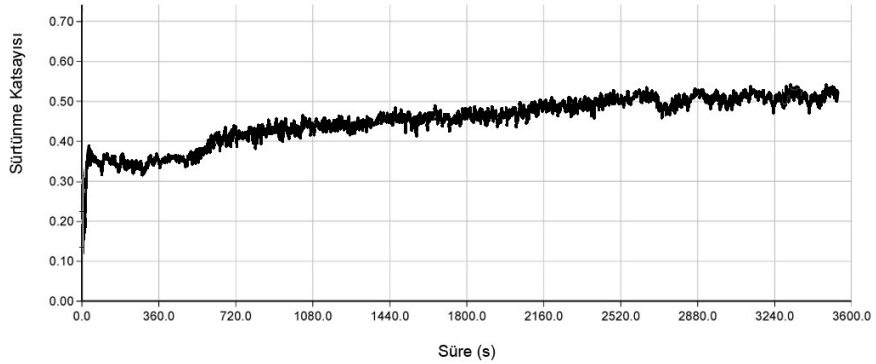
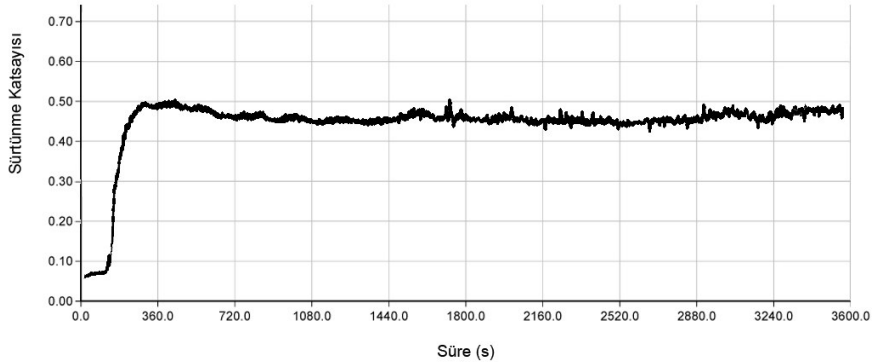
Şekil B.15: ND4 kodlu numune için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi (Devam).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		

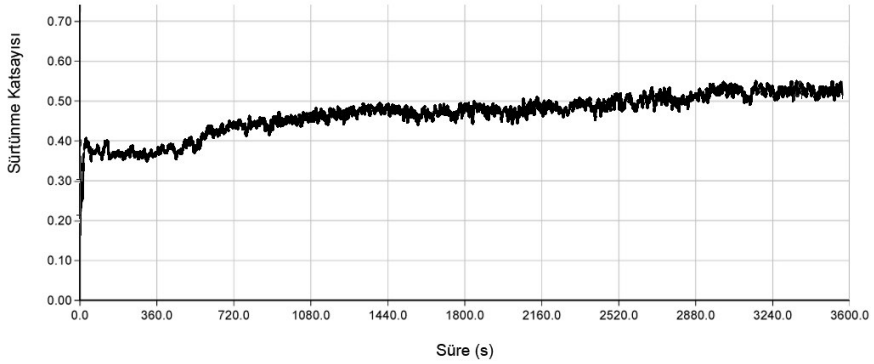
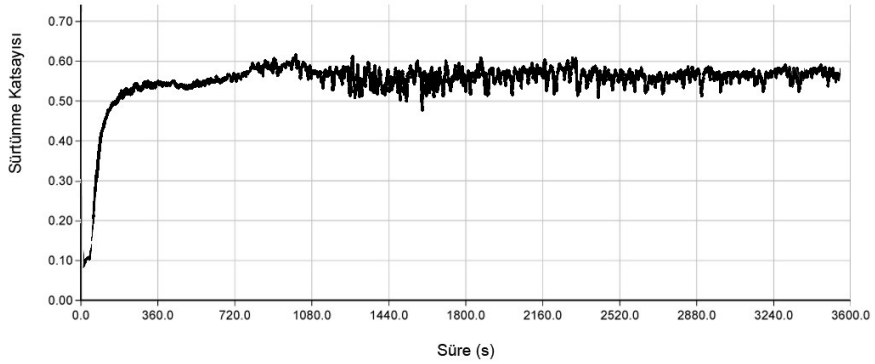
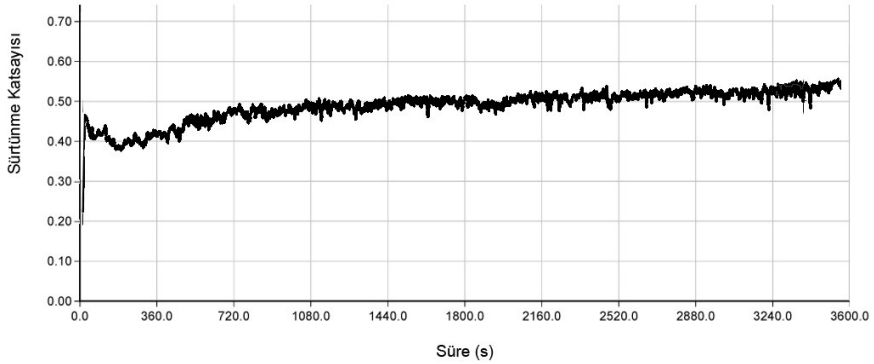
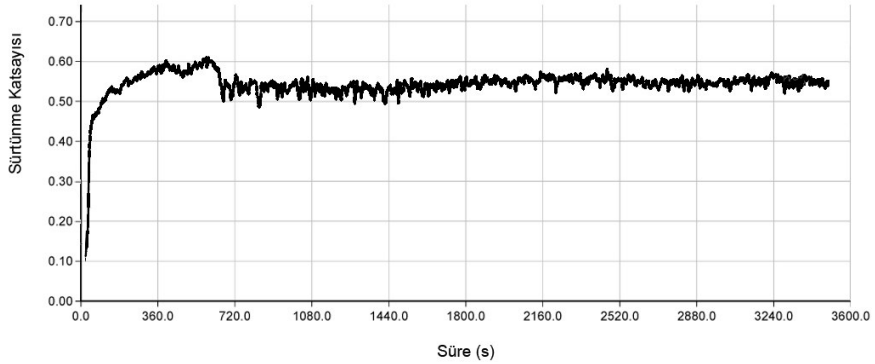
Şekil B.16: ND8 kodlu numune için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi.

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
3N		
5N		

Şekil B.16: ND8 kodlu numune için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi (Devam).

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
1N		
2N		

Şekil B.17: ND10 kodlu numune için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi.

Yük	Kuru Ortam	Sıvı Ortam
3N		
5N		

Şekil B.17: ND10 kodlu numune için sürtünme katsayısının, 1N, 2N, 3N ve 5N yük altında kuru ve saf su ortamı koşullarında aşınma deneyi süresince değişimi (Devam).

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İstanbul'da doğan Ahmet Sacit Eroğlu, ilk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1999 yılında Kadıköy Kazım İşmen Lisesi'nden mezun oldu. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne girdi. 2004 yılında lisans öğrenimini başarı ile tamamlayarak, "Metalurji ve Malzeme Mühendisi" ünvanını aldı. Aynı yıl içerisinde İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsüne girmeye hak kazandı ve Enstitünün Metalurji Mühendisliği Bölümü, Malzeme Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı.