



**RAYLI SİSTEM ARAÇLARINDA
KULLANILAN ALÜMİNYUM
ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVME
İŞLEMİNDEN SONRA TRİBOLOJİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Orçun CANBULAT

Eskişehir 2025

**RAYLI SİSTEM ARAÇLARINDA KULLANILAN ALÜMİNYUM
ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVME İŞLEMİNDEN SONRA TRİBOLOJİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Orçun CANBULAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Haziran 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Orçun CANBULAT'ın RAYLI SİSTEM ARAÇLARINDA KULLANILAN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVME İŞLEMİNDEN SONRA TRİBOLOJİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ başlıklı çalışması 16/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT

Üye : Doç. Dr. Mehmet Mete ÖZTÜRK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Özgün SUNAR

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Oręun CANBULAT, RAYLI SİSTEM ARAÇLARINDA KULLANILAN ALÜMİNYUM ALAşIMLARININ BİLYALI DÖVME İşLEMİNDEN SONRA TRİBOLOJİK DAVRANIşLARININ İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT

ÖZET

RAYLI SİSTEM ARAÇLARINDA KULLANILAN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVME İŞLEMİNDEN SONRA TRIBOLOJİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Orçun CANBULAT

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2025

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT

Sürdürülebilir mühendislik çözümleri doğrultusunda, raylı sistemler ve havacılık endüstrisinde en çok tercih edilen 6061-T6 alüminyum alaşımının yüzey performansını artırmak büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, bilyalı dövme işleminin bu alaşımın aşınma direnci ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. %100, %200, %500 ve %1500 kaplama oranlarında uygulanan işlem, işlenmemiş bir referans numunesiyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan mikrosertlik, aşınma testi, artık gerilme ölçümleri ve yüzey pürüzlülüğü analizleri, bilyalı dövme işleminin yüzey özelliklerini geliştirdiği ve aşınma direncini artırdığını göstermiştir. Özellikle %1500 kaplama oranında, en yüksek sertlik ve en düşük aşınma değerlerine ulaşmıştır. Mikroyapı ve SEM analizleri, yüzey altı deformasyonları ve aşınma mekanizmalarının da bu iyileşmeye katkı sağladığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, bilyalı dövme işlemi; 6061-T6 alüminyum alaşımı için etkili, uygulanabilir ve sürdürülebilir bir yüzey iyileştirme yöntemidir. Bu yöntem, özellikle hafiflik ve dayanıklılığın ön planda olduğu sektörlerde önemli avantajlar sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Triboloji, Adhezif, Abrasif, 6061-T6 alüminyum alaşımı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF ALUMINUM ALLOY USED IN RAIL SYSTEM VEHICLES AFTER SHOT PEENING PROCESS

Orçun CANBULAT

Department of Rail Systems Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2025

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fatih BOZKURT

In accordance with sustainable engineering solutions, enhancing the surface performance of 6061-T6 aluminum alloy—one of the most preferred materials in the railway and aerospace industries—is of great importance. This study investigates the effect of shot peening on the wear resistance and tribological properties of this alloy. The process was applied at coverage rates of 100%, 200%, 500%, and 1500%, and compared with an untreated reference sample. Microhardness testing, wear analysis, residual stress measurements, and surface roughness evaluations revealed that shot peening improves surface properties and increases wear resistance. Notably, the sample treated at 1500% coverage exhibited the highest hardness and the lowest wear rate. Microstructural and SEM analyses showed that subsurface deformation and wear mechanisms also contributed to these improvements. In conclusion, shot peening is shown to be an effective, applicable, and sustainable surface enhancement method for 6061-T6 aluminum alloy. This technique offers significant advantages in industries where lightweight and durability are critical.

Keywords: Tribology, Adhesive, Abrasive, 6061-T6 aluminum alloy.

TEŞEKKÜR

Bilyalı dövme işleminin gerçekleştirilmesindeki desteklerinden dolayı Eskişehir’de bulunan Türk Hava Kuvvetleri 1. Hava İkmal ve Bakım Merkezi Komutanlığı’na, taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizlerinin gerçekleştirilmesindeki değerli katkılarından dolayı Pardubice Üniversitesi Eğitim Araştırma ve Test Merkezi’nden Prof. Ing. Eva SCHMIDDOVA’ya, kalıntı gerilme ölçümlerine katkılarından ötürü Çek Teknik Üniversitesi’nden Ing. Lukáš KULICKA’ya, sürekli destek ve iş birliği için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Triboloji Laboratuvarı üyelerine, tez sürecim boyunca bilgi ve deneyimleriyle yolumu aydınlatan ve akademik rehberliğini her zaman hissettiren değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT’a, eğitim hayatım boyunca yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme, bu zorlu süreçte moral ve motivasyonu bana güç veren dostlarıma teşekkür ederim.

Orçun CANBULAT

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Orçun CANBULAT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. ÇALIŞMANIN AMACI	6
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	8
4.1. Kullanılan Alaşım ve Boyutları	8
4.2. Bilyalı Dövme İşlemi	9
4.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri	11
4.4. Mikroyapı Karakterizasyon Çalışmaları.....	11
4.5. Sertlik Testleri	12
4.6. Kalıntı Gerilme Ölçümleri	13
4.7. Aşınma Testleri	14
4.8. Aşınan Yüzeylerin İncelenmesi.....	18
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	19
5.1. Mikroyapısal ve Yüzey Analiz Sonuçları.....	19
5.2. Sertlik Sonuçları.....	31

5.3. Kalıntı Gerilme Sonuçları	33
5.4. Aşınma Testi Sonuçları.....	36
6. SONUÇLAR.....	50
KAYNAKÇA.....	52
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. 6061-T6 alaşıminın kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça)	9
Tablo 4.2. Aşınma deney parametreleri	15



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan 6061-T6 alaşımının boyutları.....	8
Şekil 4.2. Kalıntı gerilme için kullanılan yükleme-boşalma eğrisi [18].....	14
Şekil 4.3. CSM aşınma cihazı.....	14
Şekil 4.4. Şematik aşınma alanının görüntüsü.....	17
Şekil 5.1. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait mikroyapılar. Oklar yüzeyde oluşan çukurcukları göstermektedir. (125x büyütme).....	20
Şekil 5.2. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait mikroyapılar. Numunelerin kesit görüntülerinde şiddetli plastik deformasyon etkileri gözükmemektedir. (400x büyütme).....	21
Şekil 5.3. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait yüzey topografisi görüntüleri, optik mikroskop (sol), SEM (orta) ve 3D yüzey profili (sağ).	24
Şekil 5.4. Sref numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.....	26
Şekil 5.5. SP100 numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.....	26
Şekil 5.6. SP200 numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.....	27
Şekil 5.7. SP500 numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.....	27
Şekil 5.8. SP1500 numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.....	28
Şekil 5.9. Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numuneleri için yüzey pürüzlülük değerleri.....	29
Şekil 5.10. Bilyalı dövme işlemi boyunca yüzey pürüzlülük değişiminin şematik gösterimi.	29
Şekil 5.11. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait makro görüntüler. Numunenin üst kenarı boyunca malzeme akışını göstermektedir.	31
Şekil 5.12. Malzeme yığılması ve malzeme akış mekanizmasının bilyalı dövme işlemi boyunca gösterimi.	31
Şekil 5.13. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait yüzeyden içeriye sertlik değişimi.....	33
Şekil 5.14. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait temsili yüklem-boşalma eğrileri.....	34

Şekil 5.15. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait kalıntı gerilme değerleri.	36
Şekil 5.16. Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait aşınma izleri.	37
Şekil 5.17. Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait hesaplanmış spesifik aşınma testleri.	38
Şekil 5.18. Aşınma deneyi sonrası Sref numunesine ait 3D yüzey topografisi.	39
Şekil 5.19. Aşınma deneyi sonrası SP100 numunesine ait 3D yüzey topografisi.	39
Şekil 5.20. Aşınma deneyi sonrası SP200 numunesine ait 3D yüzey topografisi.	40
Şekil 5.21. Aşınma deneyi sonrası SP500 numunesine ait 3D yüzey topografisi.	40
Şekil 5.22. Aşınma deneyi sonrası SP1500 numunesine ait 3D yüzey topografisi.	41
Şekil 5.23. Sref numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.	42
Şekil 5.24. SP100 numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.	43
Şekil 5.25. SP200 numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.	44
Şekil 5.26. SP500 numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.	45
Şekil 5.27. SP1500 numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.	46
Şekil 5.28. Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait sürtünme kat sayısının mesafeye karşı değişim grafiği.	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	:	American Society for Testing and Materials
HCl		Hidroklorik asit
HF	:	Hidroflorik asit
HNO ₃	:	Nitrik asit
Hv	:	Vickers sertliği
WC	:	Tungsten karbür

1. GİRİŞ

Günümüzde özellikle ulaşım, havacılık ve yenilenebilir enerji gibi sektörlerde sürdürülebilir ve enerji verimliliği yüksek mühendislik malzemelerine olan talep önemli ölçüde artmıştır. Bu artan ihtiyaç doğrultusunda, çeşitli mühendislik malzemeleri arasından öne çıkan seçeneklerden biri de ısıl işlem görmüş 6061-T6 alüminyum alaşımıdır. Bu alaşım; mükemmel kaynak kabiliyeti, yüksek korozyon direnci ve üstün dayanım-ağırlık oranı gibi özellikleri sayesinde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. 6061-T6'nın mekanik dayanımı, esas olarak magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) elementleri ile sağlanan çökeltme sertleşmesine dayanmaktadır. Bu alaşım, düşük yoğunluğunun yanı sıra yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, iyi şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik ve mukavemet gibi çok yönlü özellikler sunar. Bu nedenlerle; pistonlar, krank ve biyel kolları, silindir kaplamaları, valfler, yatak yüzeyleri ve fren sistemleri gibi yapısal bileşenlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak tüm bu avantajlarına rağmen, AA6061-T6 alaşımı yüksek sıcaklık ve yoğun sürtünmenin hakim olduğu ortamlarda çalıştığında, yüzeylerinde aşınma ve oksidasyon kaynaklı bozulmalar meydana gelebilir. Bu tür bozulmalar, bileşenlerin servis ömrünü kısaltmakta ve sistemin genel güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle dinamik yükler altında çalışan hareketli parçalarda, yüzey performansının korunması, sistemin verimli ve uzun ömürlü çalışabilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, AA6061-T6 gibi yüksek performanslı alaşımların yüzey özelliklerini geliştirmek için uygulanan yüzey mühendisliği teknikleri – örneğin bilyalı dövme (shot peening), kaplama işlemleri veya ısıl yüzey işlemleri – son yıllarda oldukça önem kazanmıştır [1-5]. Bu yaklaşımlar sayesinde, aşınmaya ve yüksek sıcaklığa karşı direnç artırılarak, malzemenin zorlu çalışma koşullarında daha dayanıklı hale getirilmesi hedeflenmektedir.

Bilyalı dövme, mekanik bir yüzey işleme yöntemi olarak, özellikle yorulma kaynaklı hasar olmak üzere çeşitli malzeme hasar mekanizmalarına karşı metal malzemelerin dayanımını artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılan bir tekniktir [6–8]. Bu yöntem, yüzeye yüksek hızda hareket eden küresel partiküllerin (genellikle seramik ya da metal bilyalar) çarptırılması esasına dayanır. Her bir bilya, yüzeye küçük bir çekiç gibi darbeler uygulayarak yerel plastik deformasyon oluşturur ve yüzeyde karakteristik “çukurcuklar” meydana getirir.

Bu çukurcuklar, sadece yüzeyin şekilsel özelliklerini değiştirmekle kalmaz, aynı zamanda çevredeki malzemenin elastik geri tepmesi nedeniyle yüzey tabakasında kalıcı

basma gerilmeleri (bası yönünde artık gerilmeler) oluşmasına neden olur. Bu basma gerilmeleri, özellikle tekrarlı yükleme altında çalışan sistemlerde çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engelleyici bir bariyer görevi görür. Böylece, bilyalı dövme işlemi uygulanan bir metal yüzey, çatlakların büyümesini geciktirerek parça ömrünü önemli ölçüde uzatabilir ve yorulma ömrü belirgin biçimde artırılmış olur [9].

Ayrıca, bilyalı dövme işlemi aynı zamanda şiddetli plastik deformasyon (SPD, severe plastically deformed) yöntemlerinden biri olarak kabul edilir. Bu yönüyle işlem, yüzey tabakasındaki tane boyutunu inceltir, dislokasyon yoğunluğunu artırır ve böylece yüzey sertliği ile aşınma direncinde kayda değer bir iyileşme sağlar. Bu avantajlar, alaşımın mekanik özelliklerini bozmadan, sadece yüzeye etki ederek kazanılmış olur [10]. Bu da bilyalı dövme işlemi, sadece yorulma dayanımı değil, aşınma ve yüzey mukavemeti açısından da değerli hale getirir.

Daha ileri düzey uygulamalarda, örneğin bilyalı şekillendirme (shot peen forming) işlemlerinde, bu basma gerilmeleri kontrollü şekilde büyük iş parçalarının şekillendirilmesinde kullanılır. Bu teknik, özellikle uçak gövdesi parçaları gibi geniş ve ince kesitli malzemelerin, kalıpsız bir şekilde belirli bir eğriliğe getirilmesinde avantaj sağlar.

Ancak bilyalı dövme işleminin etkinliği, birbirine bağlı birçok parametreye bağlıdır. Bunlar arasında:

- Bilya boyutu ve malzeme türü (metal, seramik vb.),
- Kaplama oranı (coverage): yüzeyin ne kadarının işlemde geçtiği,
- Çarpma hızı (impact velocity),
- Bilya yoğunluğu,
- Bilya akış hızı (shot flow rate),
- Nozul ile yüzey arasındaki mesafe,
- İş parçasının mekanik özellikleri ve davranışı (özellikle doğrusal olmayan deformasyon özellikleri) gibi faktörler yer alır.

Bu çok sayıda ve etkileşimli parametrenin doğru şekilde seçilmesi ve kontrol edilmesi, işlemin sonuçlarının öngörülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, bilyalı dövme işleminin tasarımı ve endüstriyel uygulaması sırasında, parametrelerin doğru belirlenmesi ve simülasyon/analiz destekli bir süreç yönetimi büyük önem taşır. Doğru kontrol edilmediğinde işlem, beklenen olumlu etkileri sağlamayabilir veya istenmeyen yüzey hasarlarına yol açabilir [11].

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Mevcut literatürde, bilyalı dövme işlemi uygulanan alüminyum alaşımları üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, korozyon direnci ve yorulma dayanımı üzerindeki iyileştirmelerin değerlendirilmesine odaklanmıştır. Bunun temel nedeni, alüminyum alaşımlarının havacılık, denizcilik ve otomotiv gibi sektörlerde geniş kullanım alanına sahip olmasıdır. Bu sektörlerdeki bileşenler sıklıkla döngüsel yüklemelere (yorulma) ve agresif (korozif ortam) çevresel koşullara maruz kalmaktadır.

Chen ve arkadaşları, 6061 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerine yönelik çeşitli bilyalı dövme işlem parametrelerinin etkilerini araştırmıştır [12]. Elde edilen sonuçlar, tüm işlenmiş örneklerde hem basma tipi artık gerilmelerde hem de yüzey pürüzlülüğünde belirgin iyileşmeler olduğunu ortaya koymuştur. En yüksek basma gerilmesi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri, 5.5 lbs/dakika bilya akış hızı ve 20 PSI hava basıncı altında elde edilmiştir. Mikroyapı analizleri, tüm işlem görmüş numunelerde ortalama tane boyutu 100 nm'nin altında olan nanoyapılı bir yüzey tabakası oluştuğunu göstermiştir. Bu nanokristalin yapı, özellikle tane incelmesi (grain refinement) ve şekil değişimi sertleşmesi (strain hardening) mekanizmaları sayesinde yüzeyin mikrosertliğini artırmıştır. Ancak, yapılan elektrokimyasal ölçümler, korozyon morfolojisi gözlemleri ve EDS analizleri, bu nanokristalin yapının aynı zamanda korozyon hassasiyetini artırdığını ortaya koymuştur.

Mohammadi ve ekibi, eş kanallı açılal presleme (ECAP) ve sonrasında uygulanan bilyalı dövme işleminin 6082 alüminyum alaşımının yorulma davranışı üzerindeki birleşik etkilerini incelemiştir [13]. Yapılan çekme, mikrosertlik ve yorulma testleri, tek geçişli ECAP + bilyalı dövme + polisaj kombinasyonunun yorulma ömrünü olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Ancak ECAP geçiş sayısı artırıldığında, yüzey altı bölgelerde malzeme yumuşaması (work softening) meydana gelmiş ve bu da yorulma dayanımını önemli ölçüde düşürmüştür. Kırılma yüzeyi (fraktografi) analizleri, çatlak başlangıç noktalarının çok geçişli ECAP sonrası yüzeyden yüzey altına kaydığını göstermiştir.

Sun ve arkadaşları, ultrasonik bilyalı dövme (USP, ultrasonic shot peening) uygulanmış AA7150 alüminyum alaşımının mikroyapı, korozyon davranışı ve termal kararlılığı üzerine bir analiz gerçekleştirmiştir [14]. Bu işlem, tabakalaşma eğilimini (exfoliation) azaltmış, hem normal hem de enine kesitlerde tane sınırı korozyonunu önlemiş ve çukurlaşma potansiyelini (pitting potential) pozitif yönde kaydırmıştır. Bu yerel korozyon direnci artışı, yüzeyde oluşan eş eksenli nanotaneciklerin varlığına

bağlanmıştır. Bilyalı dövme işlemi sırasında yaşlandırma ile oluşmuş η' ve η çökeltileri yüzeyden çözünmüştür. Ancak 18 aylık doğal yaşlanma sonrasında, bu çökeltiler yeniden oluşmuş ve yüzeyde yumuşama gözlenmiştir.

Ravnikar ve ekibi, 6082-T651 alüminyum alaşımına uygulanan bilyalı dövme işleminin mekanik ve korozyon özelliklerine etkisini araştırmıştır [15]. Mikroyapı, yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik, artık gerilmeler ve korozyon davranışı işlenmiş ve işlenmemiş örnekler arasında karşılaştırılmıştır. Yüzeyde çatlaklar ve tabakalaşmalar, yalnızca yüksek çalışma basınçlarında (4 ve 8 bar) gözlemlenirken, 1.6 bar değerinde bu tür hasarlara rastlanmamıştır. 8 bar basınçta yapılan bilyalı dövme işlemi, yüzey pürüzlülüğünü 15 kattan fazla artırmış ve mikrosertliği %27 oranında yükseltmiştir. Ayrıca, daha derin basma tipi artık gerilme tabakaları oluşturulmuştur. Tüm işlem görmüş örneklerde, anodik çözünme hızının azalmasıyla birlikte korozyon direncinde gelişme sağlanmıştır. En düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip numunede, akım yoğunluğu, işlenmemiş alaşıma göre iki kattan daha düşük ölçülmüştür.

Toparli, Al6061-T651 plakaların balistik performansı üzerine bilyalı dövme işleminin etkisini incelemiş ve bu kapsamda bir dizi gaz tabancası ve tungsten küp mermilerle yapılan darbe deneyleri gerçekleştirmiştir [16]. Deneyler hem bilyalı dövme uygulanmış hem de uygulanmamış plaka yüzeylerine yönelik yapılmıştır. Balistik sınır değerleri, işlem görmemiş temel plaka ile 12A ve 16A Almen yoğunluğunda shot peening uygulanmış plakalar için belirlenmiştir. Yapılan tamamlayıcı analizlerde sertlik, artık gerilmeler, yüzey pürüzlülüğü ve element dağılımı değerlendirilmiştir. Sertlik artışı ve basma gerilmeleri gözlemlenmiş olsa da belirli test koşullarında bilyalı dövme işlemi balistik sınırı anlamlı düzeyde artırmamıştır.

Son olarak, Mathi ve arkadaşları, bilyalı dövme işleminin Al 6061 alaşımının mikroyapısı, yüzey özellikleri, çökeltme davranışı, sertliği ve aşınma direnci üzerindeki etkilerini incelemiştir [17]. İşlem, tane yapısını önemli ölçüde inceltmiş; ortalama tane boyutu 95 μm 'den 8.2 μm 'ye, çökelti boyutu ise 1.5 μm 'den yaklaşık 1 μm 'ye düşürülmüştür. Bu değişiklikler, yüzeyde oluşan plastik olarak şekil değiştirmiş bir tabakayla birlikte yüzey sertliğini 111.1 Hv'ye yükseltmiş ve aşınma direncini artırmıştır. EDS analizleri, Mg_2Si çökeltilerinin yüzeyde daha homojen bir dağılım sergilediğini ve ince bir oksit tabakası oluştuğunu göstermiştir; bu unsurlar da sertlik artışına katkı sağlamıştır. -335 MPa'lık artık basma gerilmesi, 300 μm derinlikte ölçülmüş ve bu gerilmeler, çatlak oluşumunu ve ilerlemesini zorlaştırarak malzemenin dayanımını

artırmıştır. Aşınma testleri, aşınma oranının 8.1'den $4.2 \text{ mg/m} \times 10^3$ 'e düştüğünü, sürtünme katsayısının ise 1.13'ten 0.98'e azaldığını göstermiştir. Bu iyileşmeler, incelmış mikroyapı, artan sertlik ve basma gerilmeleri ile doğrudan ilişkilidir.



3. ÇALIŞMANIN AMACI

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda, 6061-T6 alüminyum alaşımının aşınma direnci ve tribolojik davranışı üzerine farklı kaplama oranlarında (coverage) uygulanan bilyalı dövme (shot peening) işleminin etkilerine yönelik deneysel araştırmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Bu durum, özellikle yüzey mühendisliği alanında, bu alaşımın performansını artırmaya yönelik derinlemesine analizlerin eksikliği anlamına gelmektedir.

Bu çalışma, literatürdeki bu önemli boşluğu doldurmayı amaçlamakta ve bilyalı dövme işleminin farklı kaplama oranlarıyla uygulanmasının 6061-T6 alüminyum alaşımının yüzey özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemektir. Bu kapsamda;

Mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu sayede yüzeyde oluşan sertleşmenin düzeyi nicel olarak belirlenmiştir. Bu veriler, uygulanan deformasyonun malzemenin yüzey sertliğine olan katkısını değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır.

Bilya-plaka tipi aşınma testleri (ball-on-plate) kullanılarak, farklı işlem koşullarına maruz kalan numunelerin aşınma performansı ve tribolojik davranışı ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Bu testler sayesinde sürtünme altındaki çalışma koşullarında malzemenin yüzeyde gösterdiği direnç ortaya konmuştur.

Artık gerilme ölçümleri, yüzeyde bilyalı dövme işlemiyle indüklenen basma gerilmelerinin büyüklüğü ve bu gerilmelerin yüzey altına ne kadar derinliğe kadar nüfuz ettiğini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çünkü bu basma gerilmeleri, özellikle çatlak oluşumu ve ilerlemesini engelleyerek yorulma ömrünü uzatıcı etkiler sağlar.

Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ile bilyalı dövme sonrası oluşan topografik değişimler değerlendirilmiş, yüzey morfolojisindeki dönüşümler detaylandırılmıştır. Bu veriler, aşınma davranışını etkileyen önemli faktörlerden biri olan yüzey geometrisinin anlaşılması açısından önemlidir.

Bunlara ek olarak, mikroyapı karakterizasyonu ve aşınmış yüzeylerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmesi, yüzey altındaki deformasyonların görsel olarak belirlenmesini sağlamış ve aşınma mekanizmalarının (malzeme kaybının hangi yollarla gerçekleştiği)temel nedenlerini aydınlatmak amacıyla kullanılmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma sadece deneysel veri sağlamakla kalmayıp aynı zamanda farklı kaplama oranlarında uygulanan malzeme kaybının hangi yollarla gerçekleştiği işleminin 6061-T6 alaşımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koyarak,

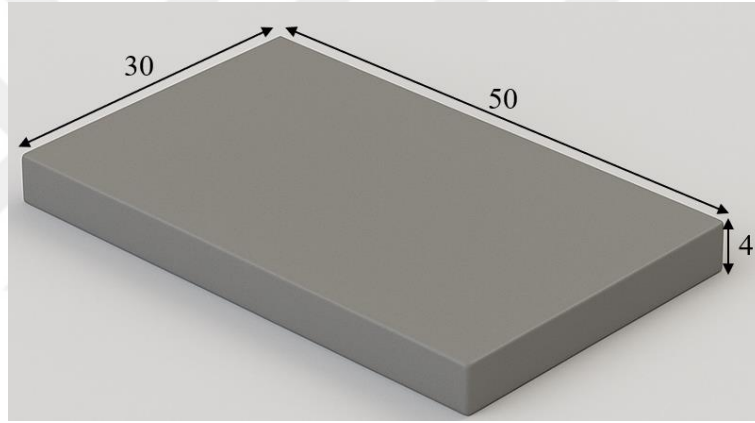
yüzey mühendisliği, aşınma mekaniği ve malzeme bilimi alanlarında önemli katkılar sunmaktadır. Elde edilen bulgular, bu tür alaşımların zorlu koşullarda daha dayanıklı hale getirilmesi adına ileriye dönük yüzey modifikasyon stratejilerinin geliştirilmesi için sağlam bir temel oluşturmaktadır.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kullanılan Alaşım ve Boyutları

Tercih edilen malzeme raylı sistemler ve havacılık endüstrisinde en çok tercih edilen alüminyum alaşımı olan 6061-T6 alaşımıdır. Bu malzeme raylı sistem araçlarında farklı yük, aşınma ve ortam koşullarına maruz kalan yolcu tutamaklarında tercih edilen bir malzemedir. Bu çalışmada, bilyalı dövme deneyleri için 4 mm kalınlığında 6061-T6 alüminyum alaşımı plakalar kullanılmıştır. Deney numuneleri, ana plakadan 30 mm × 50 mm boyutlarında dikdörtgen kesitler halinde hazırlanmıştır (Şekil 1). Numuneler, yüksek hassasiyetle ve yüzey deformasyonunu en aza indirmek amacıyla aşındırıcı diskli kesme makinesi kullanılarak kesilmiştir.



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan 6061-T6 alaşımının boyutları

Bilyalı dövme işlemine geçilmeden önce, tüm numune kenarları 1200 numara silisyum karbür (SiC) zımpara kâğıdı ile taşlanarak düzgün hale getirilmiş, ardından numuneler yüzeydeki yağ, kir ve partiküllerden tamamen arındırılacak şekilde temizlenmiştir. Bu işlemler, hem yüzey hem de kenar bölgelerde homojenlik sağlamak amacıyla titizlikle gerçekleştirilmiştir. Deneysel tekrarlanabilirliği artırmak ve istatistiksel güvenilirliği sağlamak amacıyla, her bir işlem koşulu için üçer adet numune hazırlanmıştır.

Kullanılan 6061-T6 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi, üretici firma tarafından sağlanan verilere dayanarak Tablo 1'de sunulmuştur. Bu alaşımın "T6" yaşlandırma işlemi, üç temel adımdan oluşur:

Tablo 4.1. 6061-T6 alaşımının kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça)

Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Al
0.41	0.70	0.14	0.17	0.04	0.24	0.86	0.05	Kalan

- 1) Çözeltiyi alma ısııl işlemleri: Yaklaşık 538 °C sıcaklıkta 12 saat boyunca uygulanır. Bu aşama, alaşım elementlerinin matrise homojen bir şekilde dağılmasını sağlar.
- 2) Suda ani soğutma (quenching): Parçalar, yaklaşık 66–100 °C sıcaklıktaki suya daldırılarak hızla soğutulur. Bu sayede çözeltideki elementlerin homojen dağılımı korunur.
- 3) Yapay yaşlandırma (artificial aging): Yaklaşık 154 °C’de 3–5 saat boyunca fırınlanarak mikro yapı içerisinde çökeltme sertleşmesi (precipitation hardening) sağlanır. İşlem sonunda malzeme oda sıcaklığında doğal olarak soğutulur.

Bu ısııl işlem dizisi, özellikle Mg₂Si (magnezyum silisit) gibi çökeltilerin oluşmasını teşvik ederek, alaşımın mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirir. Böylece 6061-T6 alaşımı, yüksek dayanım ve iyi şekillenebilirlik arasında dengeli bir yapı kazanır.

Üretici tarafından sağlanan teknik verilere göre, bu alaşımın akma dayanımı (yield strength) 274 MPa, çekme dayanımı (ultimate tensile strength) 334 MPa ve kopma uzaması (elongation at fracture) %20.1 olarak belirtilmiştir. Bu değerler, T6 tavlama (temperleme) işleminin tipik mekanik performansını yansıtmakta olup, yapısal uygulamalar için gereken mukavemet, süneklik ve dayanıklılık özelliklerini dengeli şekilde sunmaktadır. Sonuç olarak, deneylerde kullanılan 6061-T6 alaşımı hem yapısal bütünlük hem de yüzey mühendisliği açısından oldukça elverişli bir malzeme olup, bilyalı dövme işlemleriyle daha da geliştirilmeye uygun bir altyapıya sahiptir.

4.2. Bilyalı Dövme İşlemi

Bilyalı dövme işlemleri, deneyimli personel tarafından Türk Hava Kuvvetleri 1. Hava İkmal ve Bakım Merkezi Komutanlığı (HİBMK) bünyesinde yer alan bilyalı biriminde manuel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar, endüstriyel ölçekte kullanılan IEPCO Micropeen-Peenmatic 2000S model bilyalı dövme cihazı ile yapılmıştır.

İşlem sırasında, bilyelerin yüzeye çarpma mesafesi olan "standoff mesafesi" sabit olarak 150 mm tutulmuştur. Aynı zamanda, tüm numuneler için çarpma açısı yaklaşık 90° olarak ayarlanarak, yüzeye dik açıyla etki eden bilyeler sayesinde homojen bir yüzey işlemi sağlanmıştır. Bu parametrelerin sabit tutulması, deneysel tekrar edilebilirlik açısından büyük önem arz etmektedir.

Uygulanan işlemin doğruluğunu ve kalite kontrolünü sağlamak amacıyla, Almen şerit testleri ve kaplama oranı değerlendirmeleri, yine aynı birimde görevli sertifikalı denetçiler tarafından yapılmıştır. Almen testi, yüzeye uygulanan enerjinin şiddetini ölçmekte kullanılan ve bilyalı dövme işlemlerinde yaygın olarak kabul gören bir standarttır. Böylece, işlem süreci boyunca parametrelerin tutarlılığı güvence altına alınmıştır.

Bilyalı dövme işlemleri, 6061-T6 alüminyum alaşımı numunelere, sertliği 55–62 HRC ve çapı 0.26 mm olan S110 sınıfı çelik bilyalar kullanılarak uygulanmıştır. Bu bilyalar hem yüksek sertlikleri hem de uygun tane boyutları sayesinde yüzeyde istenilen deformasyonu oluşturarak etkin bir plastik şekil değişimine neden olurlar.

İşlemin tek bir yüzeye uygulanması tercih edilmiş ve %100 kaplama oranına ulaşmak için gereken süre 25 saniye olarak belirlenmiştir. Bu süre, daha yüksek kaplama oranlarına ulaşmak için orantılı şekilde artırılmıştır. Uygulama süresine bağlı olarak, bilyalar yüzeye daha fazla temas etmekte ve böylece daha yoğun plastik deformasyon ve daha yüksek basma gerilmeleri oluşmaktadır.

Bilyalı dövme işlemi süresince, tüm numuneler için sabit olarak 50 Psi hava basıncı kullanılmıştır. Bu işlem, yüzeye çarpan bilyaların kinetik enerjisinin kontrol edilmesi açısından kritik bir parametredir.

Çalışma kapsamında, farklı kaplama oranlarında bilyalı dövme uygulanmış dört numune grubu hazırlanmış ve ek olarak hiç işlem görmemiş bir referans numune ile karşılaştırmalı değerlendirme yapılmıştır. Uygulanan kaplama oranları ve kaplama oranını gösteren numune kısaltmaları şunlardır: %100 (SP100), %200 (SP200), %500 (SP500) ve %1500 (SP1500). Ayrıca, hiçbir işlem görmemiş referans numune ise Sref olarak adlandırılmıştır. Bu şekilde beş farklı grup oluşturulmuş olup, her biri aşınma davranışı, mikrosertlik, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilme durumu ve mikroyapı açısından karşılaştırmalı ve bütüncül bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu gruplandırma, sonuçların sistematik olarak incelenmesine olanak sağlamış ve bilyalı dövme işleminin kaplama oranına bağlı olarak nasıl farklı performans çıktıları oluşturduğunu ortaya koymuştur.

4.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, bilyalı dövme işlemi tamamlandıktan sonra, temassız profil analizlerinde yüksek hassasiyet sunan Mitutoyo SJ 401 model yüzey profilometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, yüzeyin mikrometre düzeyindeki topografik özelliklerini hassas bir şekilde tespit etme kabiliyetine sahiptir ve özellikle yüzey mühendisliği çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir.

Her bir numunede, yüzeydeki işlemin homojenliğini ve ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla birden fazla farklı bölgeden ölçüm alınmıştır. Ölçümler, işlem uygulanmış yüzeyin 4 mm'lik kesitlerini kapsayacak şekilde yapılmıştır. Bu sayede, yüzeyin tamamını temsil edecek şekilde hem tekrar edilebilirlik hem de doğruluk sağlanmıştır.

Aynı numune üzerindeki farklı noktaların ölçülmesi, bilyalı dövme işleminden sonra yüzeyde oluşabilecek pürüzlülük dağılımını ve olası yerel değişimleri tespit etmek açısından kritik öneme sahiptir. Bu yaklaşım, yüzey pürüzlülüğünün sadece tek bir noktaya bağlı kalmadan, genel yüzey kalitesi hakkında daha temsil edici ve istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmıştır. Ayrıca yüzey topografisi optik mikroskop ile kaydedildikten sonra ImageJ programına aktarılarak, yüzeyin 3 boyutlu yapısı ortaya çıkarılmıştır.

4.4. Mikroyapı Karakterizasyon Çalışmaları

Farklı bilyalı dövme kaplama oranlarına maruz bırakılan numunelerin mikroyapı karakterizasyonu, çeşitli optik mikroskop sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, Clemex görüntü analiz yazılımı ile entegre Nikon Eclipse L150 optik mikroskobu ile birlikte, Olympus analiz yazılımı destekli Carl Zeiss Jena Neophot 32 mikroskobu kullanılmıştır. Bu cihazlar, mikroyapı analizlerinde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilmesini sağlayarak, yüzey ve kesit bölgelerdeki yapısal değişimlerin detaylı biçimde incelenmesine olanak tanımaktadır.

Mikroskobik incelemelere başlamadan önce, numuneler uygun boyutlara getirilmek üzere dikkatli bir şekilde kesilmiş ve ardından standart metalografik numune hazırlama prosedürleri uygulanmıştır. İlk olarak, numune yüzeylerinde yer alan düzensizliklerin giderilmesi ve düzgün bir yüzey elde edilmesi amacıyla, artan tanecik boyutuna sahip silisyum karbür (SiC) zımpara kâğıtları kullanılarak sırasıyla 120, 320,

500, 800, 1000 ve 1200 grit ile zımparalama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler, yüzeydeki pürüzleri kademeli olarak azaltarak düzgün bir yüzey hazırlanmasını sağlamıştır.

Zımparalama işlemini takiben, numuneler 3 µm boyutunda elmas süspansiyonu (DiaDouble Mono) kullanılarak parlatılmış ve yüzeyde ayna parlaklığında bir görünüm elde edilmiştir. Parlatma işlemi, mikroyapısal ayrıntıların daha net gözlemlenebilmesi açısından oldukça önemlidir.

Parlatılan yüzeyler, tane sınırlarını ve yüzey altı morfolojik değişimleri belirgin hâle getirmek amacıyla Keller dağlayıcısı ile dağlanmıştır. Bu dağlayıcı çözelti aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır: 2 ml Hidroflorik asit (HF), 3 ml Hidroklorik asit (HCl), 5 ml Nitrik asit (HNO₃) ve 190 ml saf (distile) su. Keller ayırıcı, özellikle alüminyum alaşımları için uygun bir dağlayıcı olup, tane yapısını ve olası tane incelmelerini (grain refinement) gözle görülür hâle getirir. Ayrıca bilyalı dövme işleminin neden olduğu yüzey altı deformasyonlar, mikro yapısal yönelmeler ve morfolojik değişiklikler bu sayede detaylı olarak analiz edilmiştir.

Mikroyapısal incelemeler hem numune yüzeyinde hem de kesit alanlarında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, bilyalı dövme işleminin hem doğrudan yüzeye hem de yüzey altı bölgelerine etkisi gözlemlenmiş, plastik deformasyon derinliği, tane yapısı değişimi ve olası mikro çatlak oluşumları gibi etkiler değerlendirilmiştir.

Ayrıca, bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş numunenin yan yüzey görüntüsü elde etmek amacıyla, Nikon SMZ800N model stereo mikroskop kullanılmıştır. Bu cihaz, numunenin yüzey formunu detaylı şekilde incelemeye olanak tanımış ve özellikle deformasyon etkilerinin görsel olarak belgelenmesini sağlamıştır.

4.5. Sertlik Testleri

Sertlik testi, bir malzemenin yerel plastik deformasyona karşı gösterdiği direnci değerlendirmek için kullanılan en yaygın ve etkili mekanik test yöntemlerinden biridir. Malzemenin yüzey özelliklerini nicel olarak ortaya koyması açısından sertlik ölçümleri, özellikle yüzey mühendisliği çalışmalarında kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada, mikrosertlik ölçümleri için yüksek hassasiyetli bir cihaz olan Future Tech FM-700 Vickers mikrosertlik test cihazı kullanılmıştır. Ölçümler, ASTM E384 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu standart, mikrosertlik testlerinin

uygulanışı, yük ve bekleme süresi gibi parametrelerin tanımlandığı uluslararası kabul görmüş bir prosedürdür.

Testler sırasında, her bir numuneye sabit bir yük uygulanmış olup; uygulanan yük 50 gram (gf) ve bekleme süresi 10 saniye şeklinde belirlenmiştir. Bu parametreler, özellikle yüzeyde yer alan ince sertleşmiş tabakaların (örneğin bilyalı dövme sonrası oluşan tabaka) güvenilir şekilde ölçülebilmesi için uygun bir çözünürlük sağlamaktadır.

Her numune üzerinde, yüzeyin temsil niteliği taşıyan farklı bölgelerinde en az üç ayrı ölçüm yapılmıştır. Bu yaklaşım, hem ölçüm sonuçlarının tekrar edilebilirliğini artırmakta hem de yüzeyde olası heterojenlikleri (örneğin yüzey bozuklukları, farklı deformasyon bölgeleri) dikkate almaktadır. Böylece elde edilen veriler, tüm numuneyi temsil eden daha güvenilir ortalama değerler hâlinde sunulmuştur.

Elde edilen sertlik değerleri, Vickers Sertliği (Hv) birimiyle ifade edilmiştir. Bu birim, uygulanan yük ve oluşan iz alanına bağlı olarak hesaplanmakta olup, özellikle mikro ölçekte sertlik farklılıklarını tespit etmek için oldukça uygundur.

Sonuç olarak bu testler, bilyalı dövme işleminin uygulandığı 6061-T6 alüminyum alaşımını numunelerde yüzey sertleşmesi düzeyinin değerlendirilmesi, plastik deformasyon etkilerinin incelenmesi ve yüzey mühendisliği uygulamalarının etkinliğinin belirlenmesi açısından önemli veriler sağlamıştır.

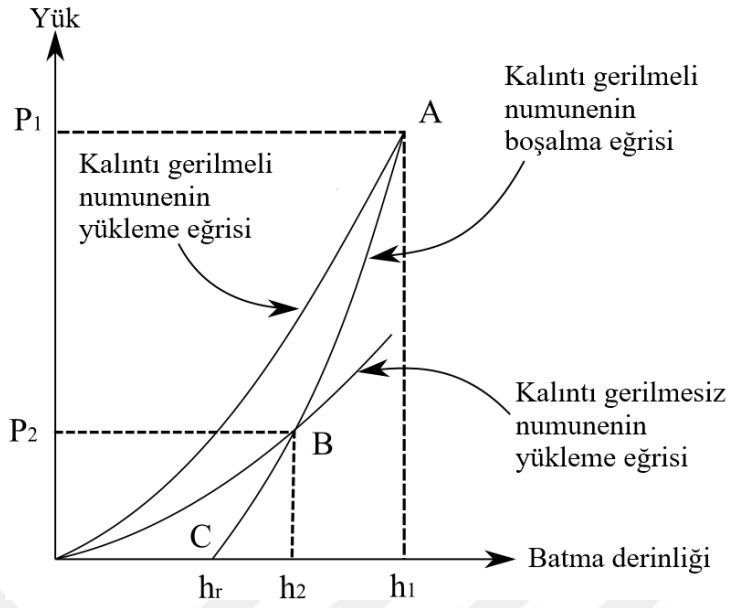
4.6. Kalıntı Gerilme Ölçümleri

Bilyalı dövme işlemi sonucunda oluşan artık gerilmeleri (residual stresses) değerlendirmek amacıyla, yükleme-boşaltma eğrilerinin analizine dayanan indentasyon yöntemi kullanılmıştır. Eğrilerdeki değişimlerin yüzey altındaki artık gerilme dağılımıyla olan ilişkisini belirlemek için Wang modeli uygulanmıştır [18].

İndentasyon testlerinde, $\alpha = 65.3^\circ$ merkez eksenî-yüzey açısına sahip, üç kenarlı piramidal geometriye sahip bir Berkovich uç kullanılmıştır. Testler, ZwickRoell ZHU 2.5 test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Artık gerilmenin hesaplanmasına yönelik ayrıntılı prosedür ilgili makalede sunulmaktadır. Teorik çerçeveye dayanarak, artık gerilme değeri, Şekil 4.2 dikkate alınarak indentasyon analizinden türetilen (4.1) numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{kalıntı} = \frac{P_1 - P_2}{2\pi \tan^2 \alpha h_r^2} \quad (4.1)$$

“ α ”, konik baskı izinin yarı açısını temsil etmektedir.

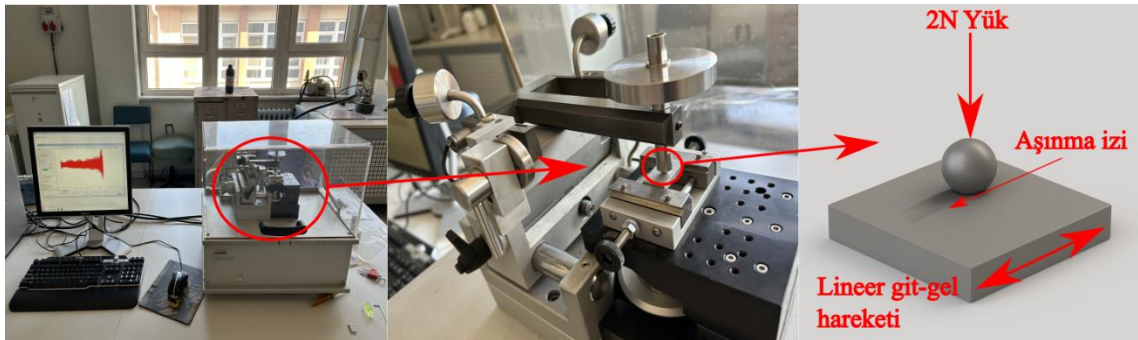


Şekil 4.2. Kalıntı gerilme için kullanılan yükleme-boşalma eğrisi [18]

4.7. Aşınma Testleri

Bu çalışmada, 6061-T6 alüminyum alaşımının sürtünme davranışı ve aşınma direnci üzerindeki bilyalı dövme işleminin etkisini araştırmak amacıyla bir dizi aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Deneyler, CSM marka aşınma cihazı kullanılarak, plaka üzeri bilya (ball-on-plate) düzeninde ve git-gel (reciprocating) kayma hareketi altında yapılmıştır. Bu test yöntemi, gerçekte karşılaşılan temas koşullarını daha gerçekçi şekilde taklit etme imkânı sunar.

Uygulanan tribolojik test yöntemi hem sürtünme katsayısının hem de aşınma oranının, belirli yük ve çevresel koşullar altında kontrol edilerek değerlendirilmesini mümkün kılar. Aşınma test düzeneğine ait şematik gösterim Şekil 4.3'te sunulmuştur.



Şekil 4.3. CSM aşınma cihazı

Aşınma testi parametrelerinin belirlenmesinde temel amaç, malzemenin çalışma ortamında maruz kalabileceği aşınma koşullarını mümkün olduğunca taklit etmek olmuştur. Ancak test süresinin sınırlı olması nedeniyle bazı parametreler bir miktar artırılarak aşınma süreci hızlandırılmıştır. Bu yaklaşım, kısa sürede daha anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Özellikle uygulanan normal yükün belirlenmesinde; karşı yüzeyde kullanılan bilyanın çapı ve test edilen malzemelerin elastik modülü gibi kritik temas mekanik parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu sayede, temas alanındaki gerilme dağılımı Hertz temas teorisi çerçevesinde uygun şekilde hesaplanmış ve testin doğruluğu sağlanmıştır.

Aşınma test parametrelerine ilişkin ayrıntılı bilgiler Tablo 2’de sunulmuştur. Testler, DIN 50324 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre kullanılan karşı cisimler, %6 kobalt içeren tungsten karbür (WC) bilyalardan oluşmakta olup, bu bilyaların çapı 3 mm’dir. Bu bilyalar; 91.6 HRA sertliğe, 690 GPa elastik modülüne ve 0.22 Poisson oranına sahiptir.

Tablo 4.2. *Aşınma deney parametreleri*

Karşı cisim	Ø 3 mm, WC- %6 Co
Yük	2 N
Toplam mesafesi	15 metre
Kayma mesafesi	8 mm
Hız	2.5 cm/s
Ortam sıcaklığı	21°C
Ortam durumu	Kuru

Karşı cisimlerin küresellik toleransları ve kimyasal bileşimleri, üretici firma (Redhill) tarafından sertifikalı olarak sağlanmış ve tüm testlerde tutarlılık sağlanmıştır. Karşı cisim olarak bu denli yüksek sertliğe sahip bir malzemenin seçilmesinin temel amacı, aşınmanın yalnızca test edilen 6061-T6 alüminyum alaşımında oluşmasını sağlamak ve bilyade deformasyon ya da aşınmayı önlemektir.

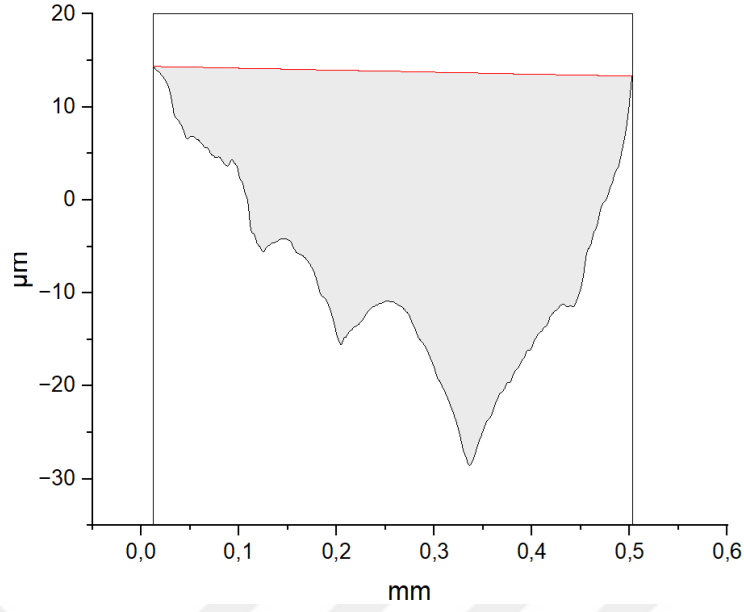
Testlerde uygulanan normal yük, 6061-T6 alüminyum alaşımının elastik özellikleri olan: 68.9 GPa elastik modül (E) ve 0.33 Poisson oranı (ν) değerleri dikkate alınarak,

Hertz temas gerilmesi teorisi ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre, test koşulları altında oluşan maksimum temas gerilmesi yaklaşık 0.94 GPa olarak belirlenmiştir.

Aşınma izlerinin genişliği ve derinliği hem yüzey pürüzlülüğü hem de kesit alanı analizi yapabilme yeteneğine sahip olan Mitutoyo SJ 401 yüzey profilometre cihazı kullanılarak yüksek hassasiyetle ölçülmüştür. Aşınmış yüzeylerden elde edilen ham profil verileri, daha sonra OriginLab Pro yazılımı ile işlenmiş ve bu sayede aşınma izlerinin kesit alanı hesaplanmıştır. Ölçümler, aşınma izi boyunca farklı noktalarda gerçekleştirilmiş; her bir ölçüm, kayma yönüne dik doğrultuda alınarak yüzey deformasyonunun temsil niteliği yüksek ortalama değerlerle değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bu yöntem, aşınma izinin tüm geometrisini dikkate alan istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar elde etmek için tercih edilmiştir. Şekil 4.4'te gösterildiği üzere, aşınma izinin kesit alanı, gri renkle gölgelenmiş alan üzerinden değerlendirilmiştir; bu alan, gerçek malzeme kaybını temsil etmektedir. Aşınma bölgesinin sınırları, ham profil verileri üzerine Gauss filtresi uygulanarak belirlenmiştir. Bu filtreleme işlemi, ölçüm verilerindeki gürültüyü azaltmakta ve gerçek yüzey deformasyonunu daha net ortaya çıkarmaktadır. Elde edilen her bir profil ölçümünden sonra hesaplanan kesit alan değerleri, birden fazla konumdan alınan ölçümlerin ortalaması alınarak genel ortalama aşınma alanı elde edilmiştir. Bu değer, daha sonra aşınma testinde kullanılan strok uzunluğu (sürtünme mesafesi) ile çarpılarak toplam aşınma hacmi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda, kayma hareketi boyunca aşınma izi geometrisinin sabit kaldığı varsayılmıştır. Elde edilen hacimsel malzeme kaybı, aşınma başına hacimsel kayıp ($V_{aşınma}$) olarak değerlendirilmiş ve bu değer Denklem (4.2) kullanılarak nicel hale getirilmiştir.

$$V_{aşınma} = SA_{ortalama} \quad (4.2)$$

Burada S, tüm testler için 8 mm olan strok (kayma mesafesi) değerini ifade etmektedir.



Şekil 4.4. Şematik aşınma alanının görüntüsü

Aşınma performansını normalize etmek ve uygulanan yük ile kayma mesafesi gibi test parametrelerine olan bağımlılığı ortadan kaldırmak amacıyla, özgül aşınma oranı (k) ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) hesaplanmıştır. Denklem (4.3) kullanılarak elde edilen bu parametre, farklı test koşulları ve malzemeler arasında aşınma davranışının karşılaştırılmasını sağlayan daha evrensel bir ölçüt sunmaktadır.

$$\text{Spesifik aşınma oranı } (k) = \frac{V_{\text{aşınma}}}{XL} \quad (4.3)$$

Burada X, 15 metre olarak belirlenen kayma mesafesini, L ise 2 N (Newton) olan uygulanan normal yükü temsil etmektedir. Tribolojik deneyler sırasında, sürtünme kuvveti sürekli olarak CSM aşınma test cihazının entegre yük hücresi (load cell) aracılığıyla izlenmiş ve kaydedilmiştir. Bu aşınma cihazı, yüksek hassasiyetli bir sensörle donatılmış olup, uygulanan normal yükü kapalı çevrim kontrol mekanizması ile düzenleyerek test koşullarının sabit ve güvenilir kalmasını sağlamıştır. Yük hücresi, test boyunca sadece dikey kuvveti izlemekle kalmamış, aynı zamanda temas yüzeyinde oluşan yatay sürtünme kuvvetini de ölçmüştür. Böylece hem yük hem de sürtünme kuvveti aynı anda ve gerçek zamanlı olarak kontrol altına alınmıştır. Aşınma cihazının motor sistemi, tork kontrollü bir mekanizmaya entegre edilmiştir. Bu sistem sayesinde numunenin git-gel (reciprocating) hareketi, belirlenen strok uzunluğu, frekans ve hız gibi parametreler çerçevesinde sabit tutulmuştur. Tüm test süresi boyunca sürtünme kuvveti

anlık olarak kaydedilmiş, böylece sürtünme davranışının zaman içinde nasıl değiştiği detaylı biçimde analiz edilebilmiştir. Sürtünme katsayısı (COF, coefficient of friction) hesaplaması, her bir zaman adımında ölçülen sürtünme kuvvetinin eş zamanlı normal yüke (L) bölünmesiyle elde edilmiştir. Bu yöntem sayesinde, test süresince oluşan anlık sürtünme katsayısı değerleri hesaplanmış ve ardından bu değerlerin ortalaması alınarak testin tamamına ait ortalama sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Ek olarak, sürtünme katsayısının zamana ve kayma mesafesine karşı değişimini gösteren sürtünme katsayısı–mesafe grafik analizleri yapılmıştır. Bu grafikler, sürtünme davranışının dinamik karakterini, zamanla sabitlenme eğilimlerini, dalgalanmaları veya oluşabilecek stick-slip (yapış-kay) fenomenlerini gözlemlemeye olanak sağlamıştır.

4.8. Aşınan Yüzeylerin İncelenmesi

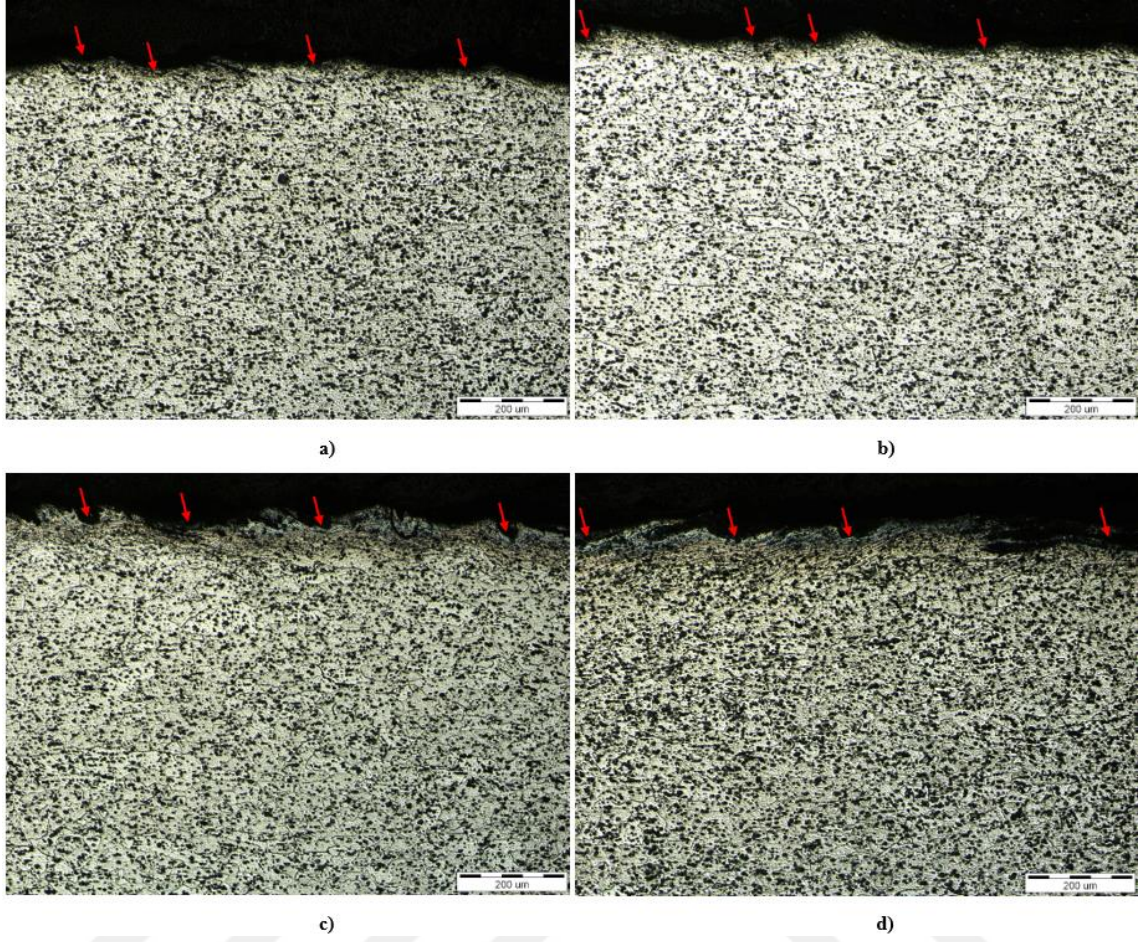
Numunelerin aşınmış yüzeyleri, aşınma testleri sırasında gerçekleşen hakim aşınma mekanizmalarını incelemek amacıyla Tescan MIRA taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Aşınmış yüzeylerin incelenmesine ek olarak, bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş numuneler de SEM ile analiz edilerek, bu işlemin oluşturduğu yüzey morfolojisi ve topografik özellikler detaylı şekilde karakterize edilmiştir. Morfolojik karakterizasyonun yanı sıra, aşınma bölgelerinde meydana gelen elementel bileşim değişikliklerini değerlendirmek amacıyla enerji saçılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, seçilen bölgelerdeki yüzey kimyasını belirleyerek, aşınma sırasında oluşan oksidasyon, malzeme transferi veya kalıntı oluşumu gibi yüzey kimyasal değişimlerinin ortaya konmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca aşınma izleri optik mikroskop ile kaydedildikten sonra ImageJ programına aktarılarak, aşınma profilinin 3boyutlu görselleri oluşturulmuştur.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Mikroyapısal ve Yüzey Analiz Sonuçları

6061-T6 alüminyum alaşımasının temel (işlem görmemiş) mikroyapısı, termomekanik şekillendirme işlemleri ve ardından uygulanan T6 ısıtıl işlem süreci sonucunda oluşan, eş eksenli ve hafifçe uzamış tanelerin düzgün bir şekilde dağıldığı bir yapı ile karakterize edilmiştir. Bu tip uzamış mikroyapı, Ji ve ark. ile Jiang ve ark. tarafından yapılan çalışmalarda da benzer şekilde elde edilmiştir [19, 20].

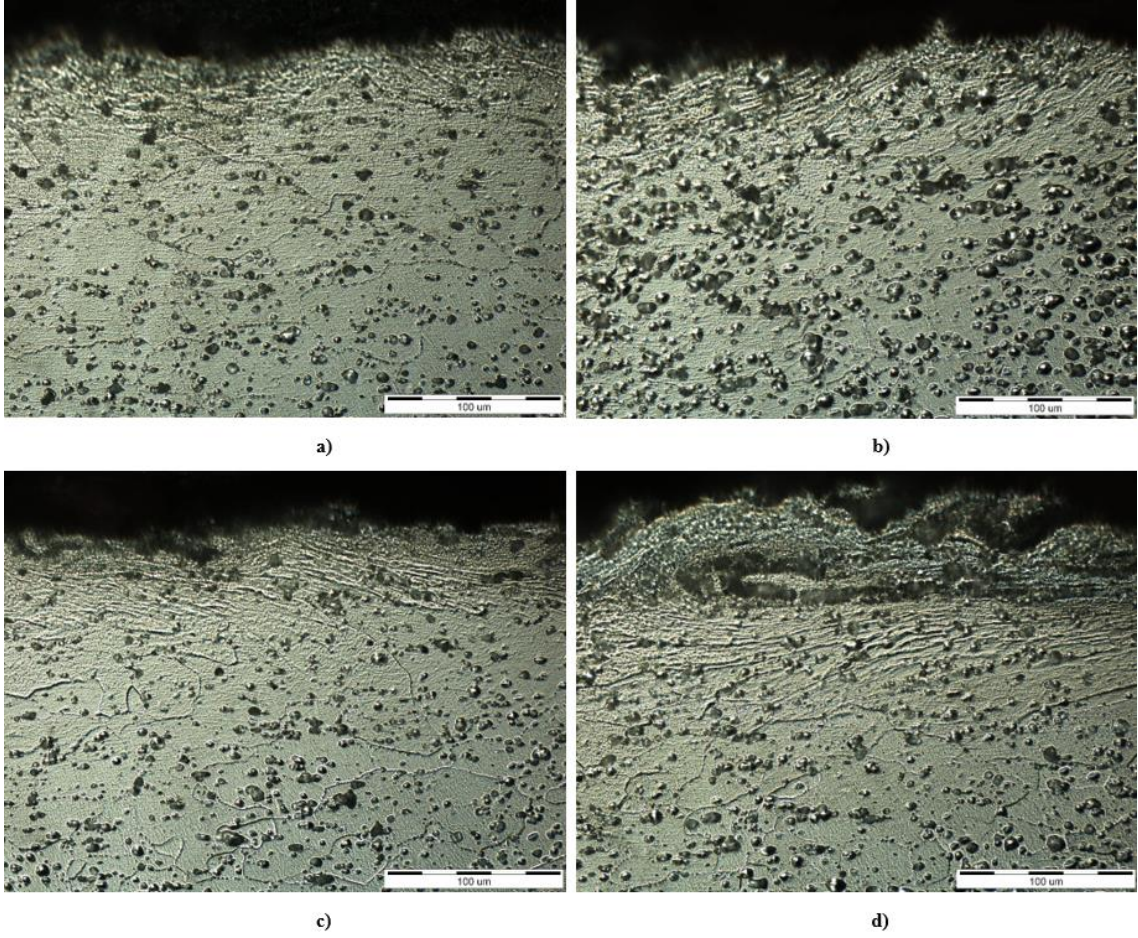
Şekil 5.1’de gösterildiği üzere, %100, %200, %500 ve %1500 olmak üzere farklı kaplama oranlarında bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuş 6061-T6 alüminyum alaşımasının mikroyapısal değerlendirmesi, yüzeyden malzeme iç bölgesine doğru uzanan belirgin bir deformasyon gradyeni ortaya koymuştur. Bu durum, bilyalı dövme işlemiyle oluşan plastik deformasyonun oldukça lokalize olduğunu ve yüzeye yakın bölgelerde yoğunlaştığını göstermektedir.



Şekil 5.1. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait mikroyapılar. Oklar yüzeyde oluşan çukurcukları göstermektedir. (125x büyütme)

Yine Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, her bir ok işareti, yüksek hızlı bilya çarpmaları sonucu oluşan çukurcukları (dimple) göstermekte ve bu çukurcuklar yerel plastik deformasyonun doğrudan kanıtıdır.

Şekil 5.2’de, 400× büyütme ile elde edilen mikroyapılar sunulmuştur. Bilyalı dövme işleminin kaplama oranı arttıkça, şiddetli plastik deformasyona uğramış yüzey tabakasının kalınlığı da kademeli olarak artmıştır.



Şekil 5.2. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait mikroyapılar. Numunelerin kesit görüntülerinde şiddetli plastik deformasyon etkileri gözükmemektedir. (400x büyütme)

Yüzeye yakın bölgelerde, özellikle yüksek kaplama oranlarında, belirgin tane incilmesi (grain refinement) gözlenmiştir; taneler uzamış ve alt-tane (subgrain) oluşumu meydana gelmiştir. Bu, dinamik toparlanma (dynamic recovery) ve olasılıkla sürekli dinamik yeniden kristalleşme (continuous dynamic recrystallization) mekanizmalarının aktif hâle geldiğini göstermektedir.

Bu ciddi şekilde deformasyona uğramış tabaka, tekrarlayan bilya darbeleriyle oluşan yoğun plastik şekil değişiminin sonucudur. Bu durum, dislokasyon yoğunluğunun artmasına, dolayısıyla yüzey sertliğinin yükselmesine neden olmuştur. Bu şiddetli deformasyon bölgesinin hemen altında, kademeli deformasyon özellikleri gösteren geçiş bölgesi (transition zone) yer almaktadır. Bu bölgede, taneler kısmen deformasyona uğramış ve yüzeyden itibaren derinlik arttıkça deformasyon etkileri azalmıştır. Geçiş bölgesinin kalınlığı ve deformasyon derecesi, uygulanan kaplama oranına bağlı olarak artış göstermiştir. Daha derin bölgelerde, yani çekirdek malzeme kısmında, mikroyapı

bozulmamış; T6 tavlama durumuna özgü eş eksenli tane yapısı korunmuştur. Bu da, bilyalı dövme işleminin etkisinin esas olarak yüzeye yakın sınırlı bir bölgede kaldığını göstermektedir.

Numune özelinde bakıldığında:

SP100 (100% kaplama): Yüzeyde sınırlı plastik deformasyon gözlenmiştir. Oluşan deformasyon tabakası oldukça incedir; taneler hafifçe uzamış ve alt-tane oluşumu minimum düzeyde kalmıştır. Dislokasyon hareketi başlatılmış olsa da, tane incelmesi veya derin yapısal değişim için yeterli etki oluşmamıştır.

SP200 (200% kaplama): Yüzey deformasyonu belirgin şekilde artmış, daha net bir geçiş bölgesi oluşmuştur. Yüzeydeki tanelerde daha fazla bozulma gözlenmiş, ancak alt-tane oluşumu hâlen sınırlı kalmıştır. Mikroyapısal incelme orta düzeydedir.

SP500 (500% kaplama): Çok daha belirgin deformasyon izleri ve daha kalın bir deformasyon tabakası oluşmuştur. Dislokasyon aktivitesi artmış, tanelerde parçalanma (fragmentation) ve ilk alt-tane oluşumları gözlenmiştir. Geçiş bölgesi daha derinlere ulaşmıştır.

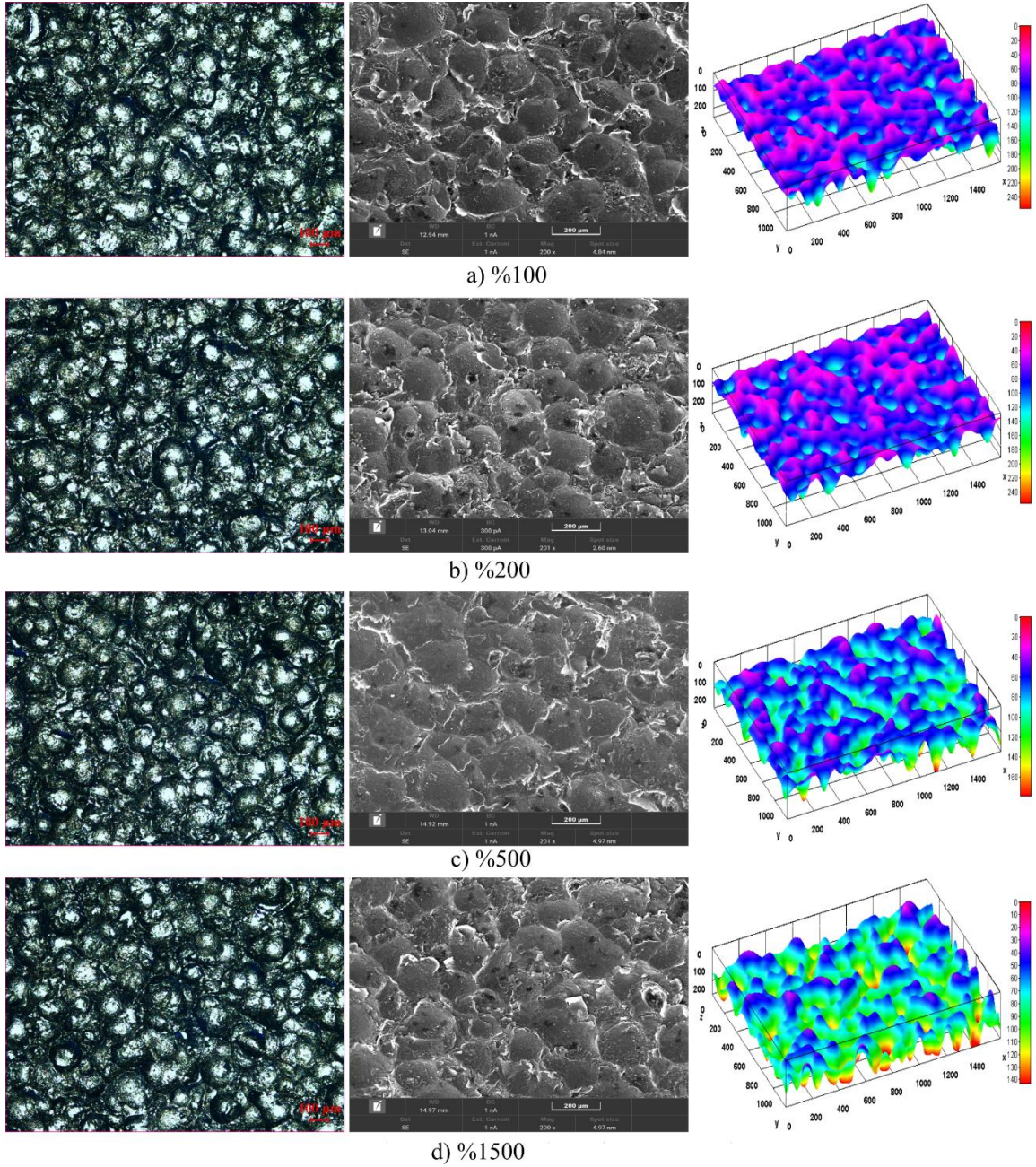
SP1500 (1500% kaplama): Yüzey, yoğun ve tekrarlı darbelere maruz kaldığı için oldukça ileri seviyede deformasyona uğramıştır. İnce şerit şeklinde (lameller) ve uzamış taneler, yoğun alt-tane yapıları ve tane incelmesi gözlenmiştir. Bu, şiddetli plastik deformasyonun tipik göstergeleridir. Tüm numuneler arasında en kalın ve en homojen deformasyon tabakası bu grupta elde edilmiştir. Bu durum, en yüksek yüzey sertliği potansiyeline işaret etmektedir.

SP100'den SP1500'e kadar olan ilerleyişte gözlemlenen bu mikroyapısal dönüşüm, kaplama oranının artışıyla mikroyapıdaki evrimin doğrudan ilişkili olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu değişimler, aşınma direnci, yüzey sertliği ve yorulma performansı gibi yüzeye bağlı mekanik özelliklerdeki gelişmelerin temelini oluşturmaktadır.

Yüzey morfolojisindeki değişimler, optik mikroskopi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3 boyutlu yüzey topografyası yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Şekil 5.3, işlenmemiş referans numunesi ile %100, %200, %500 ve %1500 kaplama oranlarında bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelere ait yüzey topografyasının karşılaştırmalı analizini sunmaktadır. Yüksek hızlı çelik bilyaların yüzeye çarpması sonucunda, yüzeylerde lokal plastik deformasyona bağlı olarak yoğun çukurcuk (dimple) dağılımı oluşmuştur. Bu çukurcuklar, tekrarlanan bilya darbelerinin

neden olduğu yerel plastik akmanın bir sonucu olarak oluşmakta, çevrelerinde hafifçe yukarı kıvrılmış kenarlar ya da malzeme birikimleri meydana getirmektedir. Bu deformasyonlar yüzeyin, işlem görmemiş haline kıyasla belirgin şekilde daha pürüzlü olmasına neden olmaktadır. Gözlemlenen çukurcuklar, bilyalı dövme işlemine özgü yüzey izleridir ve her biri bir çelik bilyanın yüzeye temas ettiği noktayı temsil eder; çukurcukların çapı ve derinliği, esas olarak bilya boyutu ve kinetik enerjisine bağlıdır. Bu pürüzlü yüzey yapısı, yağlamalı kaymalı temaslarda avantaj sağlayabilir; çukurcuklar yağ depolama hazneleri gibi davranarak sürtünmeyi ve aşınmayı azaltabilir. Dolayısıyla, bu tür yüzeylerin işlevsel etkisi kullanım amacına bağlıdır: yorulmaya duyarlı parçalarda faydalı olurken, hassas kaymalı uygulamalarda ek parlatma işlemleri gerekebilir.

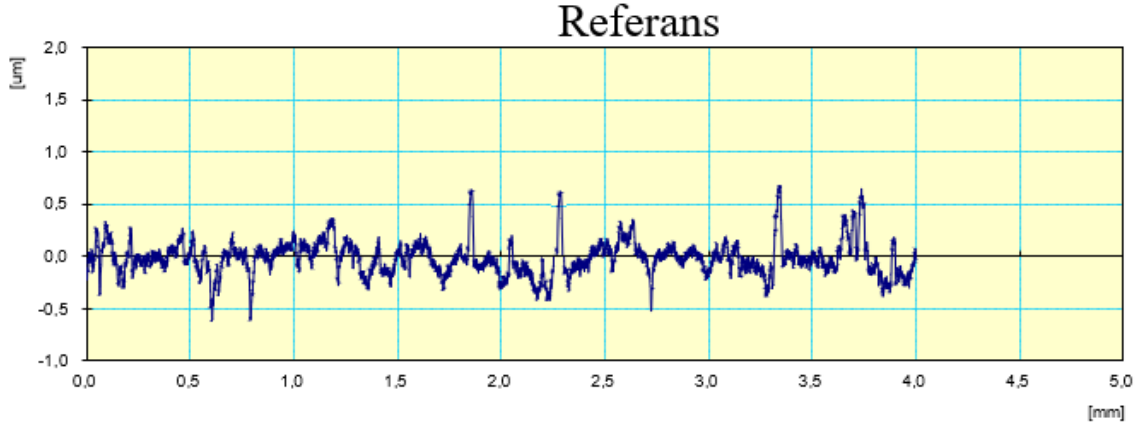




Şekil 5.3. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait yüzey topografisi görüntüleri, optik mikroskop (sol), SEM (orta) ve 3D yüzey profili (sağ).

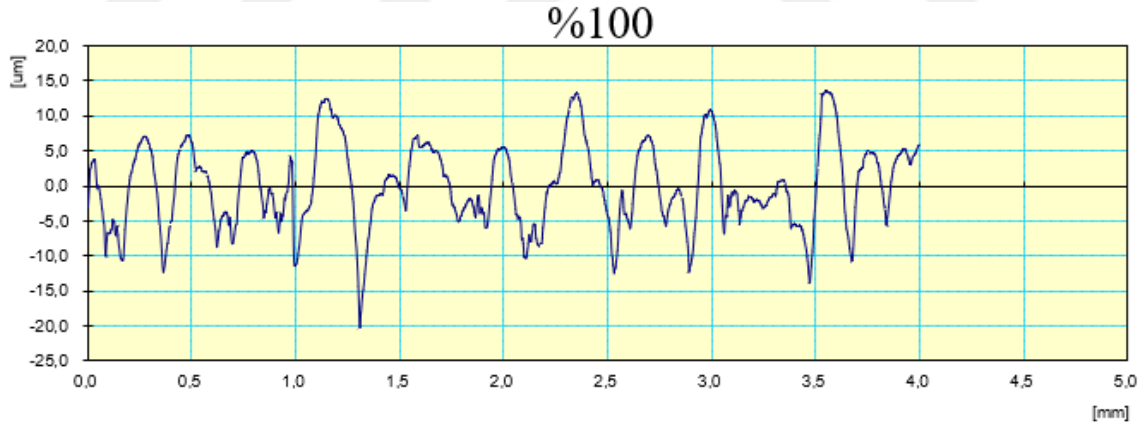
Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, hem işlem görmemiş referans numunesi hem de bilyalı dövme uygulanmış numuneler için gerçekleştirilmiş ve her işlem koşuluna ait veriler Şekil 5.4–Şekil 5.8 arasında sunulmuştur. Yüzey pürüzlülüğü parametreleri olan R_a (aritmetik ortalama pürüzlülük), R_z (profilin maksimum yüksekliği) ve R_q (karekök ortalama pürüzlülük), artan bilyalı dövme kaplama oranları ile birlikte 6061-T6 alüminyum alaşımında doğrusal olmayan (non-monotonik) bir değişim göstermiştir

(Şekil 5.9). Özellikle, R_a ve R_z değerleri %100'den %500'e kadar artış göstermiş, ancak %1500 kaplamada azalma eğilimi sergilemiştir. R_q parametresi de benzer bir eğilim izlemiş ve en düşük değeri %1500 kaplama oranında kaydedilmiştir. Bu davranış, farklı bilyalı dövme yoğunluklarında aktive olan yüzey deformasyon mekanizmaları ile açıklanabilir. Düşük ve orta düzeyde kaplama oranlarında yüzey, giderek artan sayıda bilya darbesine maruz kalmış ve her darbe lokal plastik deformasyona yol açmıştır. Kaplama oranı arttıkça darbe yoğunluğu artmış, yüzeyde daha belirgin çıkıntı ve çukurlar oluşmuştur. Bu düzensizlikler, ortalama dikey sapmaları (R_a) ve beş en yüksek tepe ile beş en derin çukur arasındaki maksimum yükseklik farkını (R_z) artırmıştır. Plastik deformasyon bölgelerinin birikmesiyle yüzey daha pürüzlü hâle gelmiş ve dolayısıyla R_a ve R_z değerleri yükselmiştir. Ancak %1500 kaplama oranında, yüzey aşırı bilyalı dövme işlemine maruz kalmış ve aynı bölgeler defalarca etkilenmiştir. Bu, malzeme akışı ve keskin çıkıntıların plastik olarak düzleşmesine neden olarak Şekil 5.10'da gösterildiği gibi bir düzleşme etkisi oluşmuştur ve aynı durum Bao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da gözlemlenmiştir [21]. Bu etki, şiddetli plastik deformasyonla yüzey özelliklerinin daha yuvarlak ve homojen hâle gelmesine neden olmuş, ortalama ve tepe-çukur pürüzlülük değerlerini düşürmüştür. Özellikle yüzeydeki çıkıntıların kenarları, bitişik çukurlara doğru plastikte akarak profilin keskinliğini ve genliğini azaltmıştır. Bu nedenle, darbe sayısı daha fazla olmasına rağmen R_a ve R_z değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. R_q değeri, matematiksel formülünde kare alma işlemi bulunduğu için ortalama çizgiden büyük sapmalara daha duyarlıdır. Düşük kaplama oranlarında, keskin tepe ve derin çukurlar R_q değerine önemli katkı sağlamıştır. Ancak %1500 kaplama oranında, tekrarlanan bilyalı dövme işlemi bu uç özellikleri düzleştirerek R_q değerinde belirgin bir düşüşe yol açmıştır. Bu durum, en yüksek kaplama oranında R_q değerinin en düşük seviyeye ulaşmasını ve yüzeydeki aşırı çıkıntıların azalmasını açıklamaktadır.



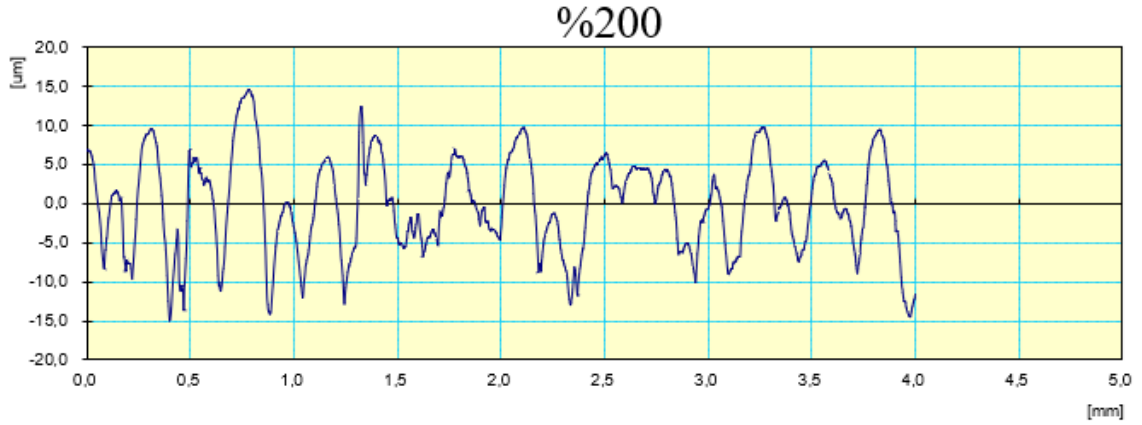
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver4.00
Standard	JIS 2001	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	0.13µm		
Rz	1.1µm		
Rq	0.18µm		

Şekil 5.4. Sref numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.



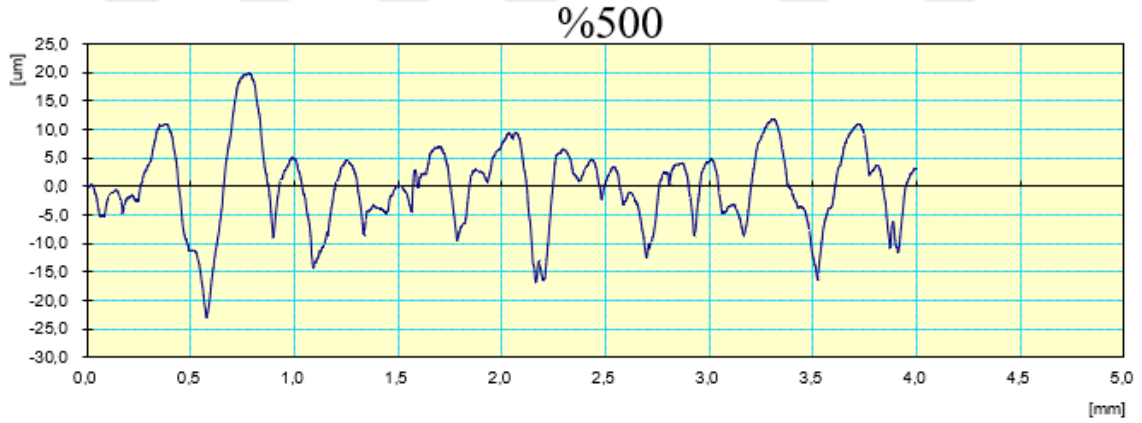
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver4.00
Standard	JIS 2001	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	4.89µm		
Rz	25.3µm		
Rq	5.98µm		

Şekil 5.5. SP100 numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.



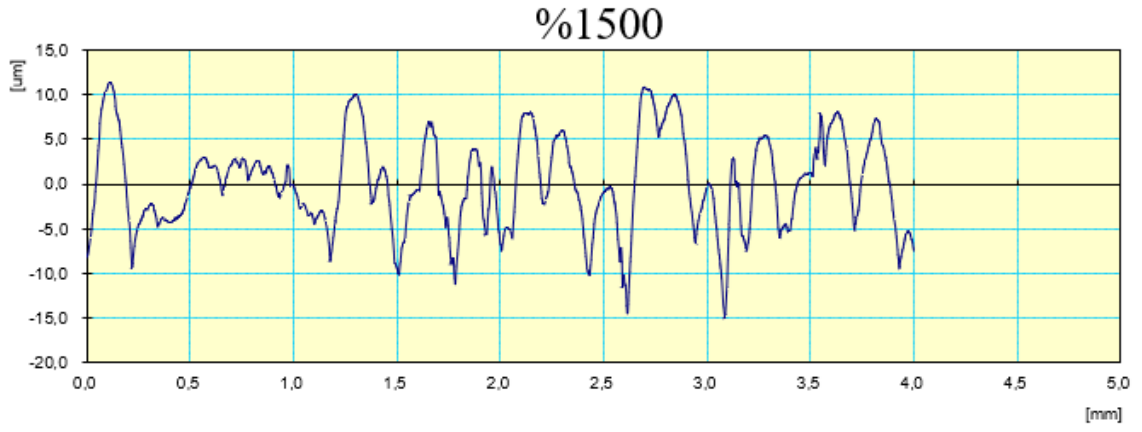
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver4.00
Standard	JIS 2001	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	5.14um		
Rz	24.2um		
Rq	6.12um		

Şekil 5.6. SP200 numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.



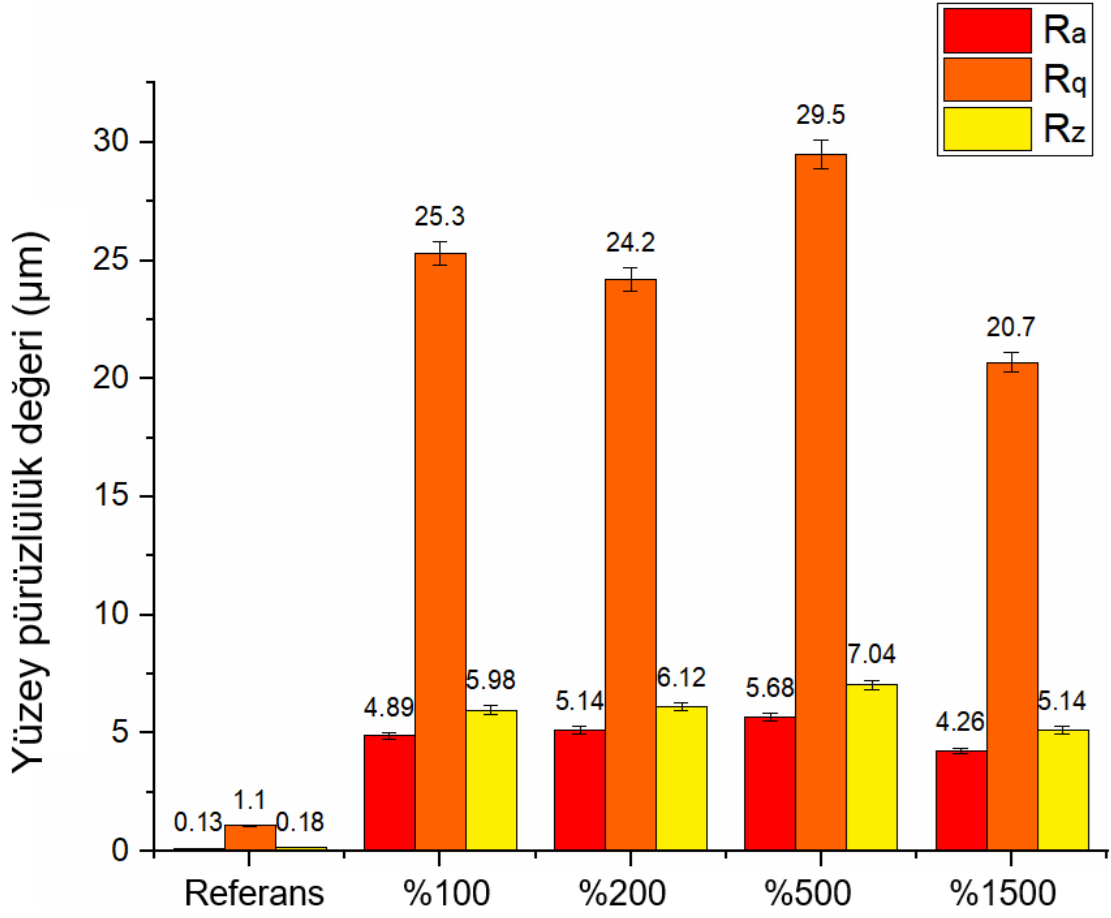
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver4.00
Standard	JIS 2001	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800um	Filter	GAUSS
Ra	5.68um		
Rz	29.5um		
Rq	7.04um		

Şekil 5.7. SP500 numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.

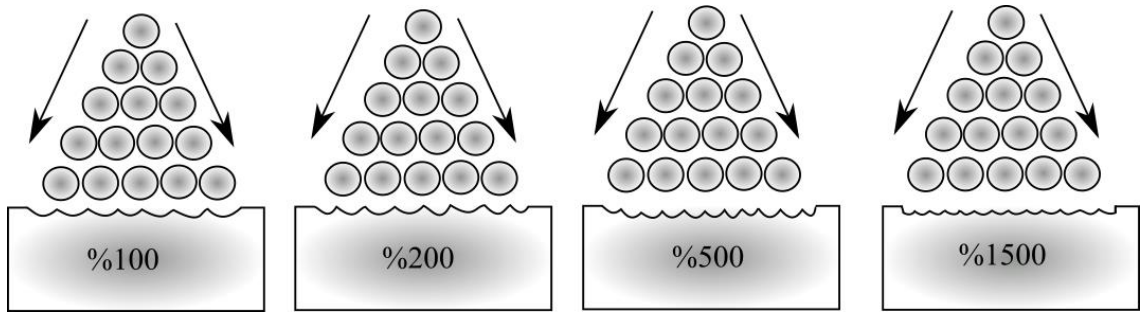


Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest SJ-400	Comment	Ver4.00
Standard	JIS 2001	N	5
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
Range	800µm	Filter	GAUSS
Ra	4.26µm		
Rz	20.7µm		
Rq	5.14µm		

Şekil 5.8. SP1500 numunesi için yüzey pürüzlülük değerleri.



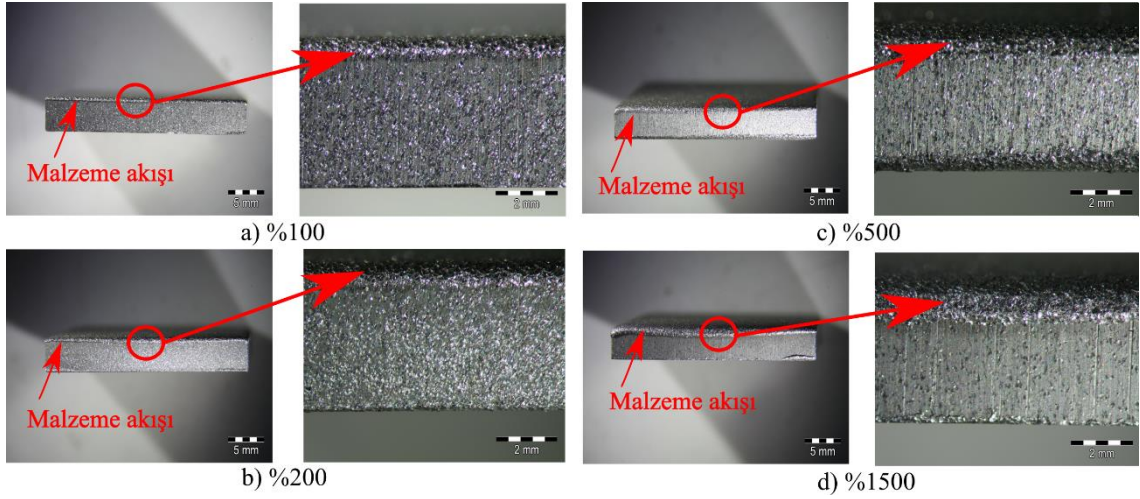
Şekil 5.9. Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numuneleri için yüzey pürüzlülük değerleri.



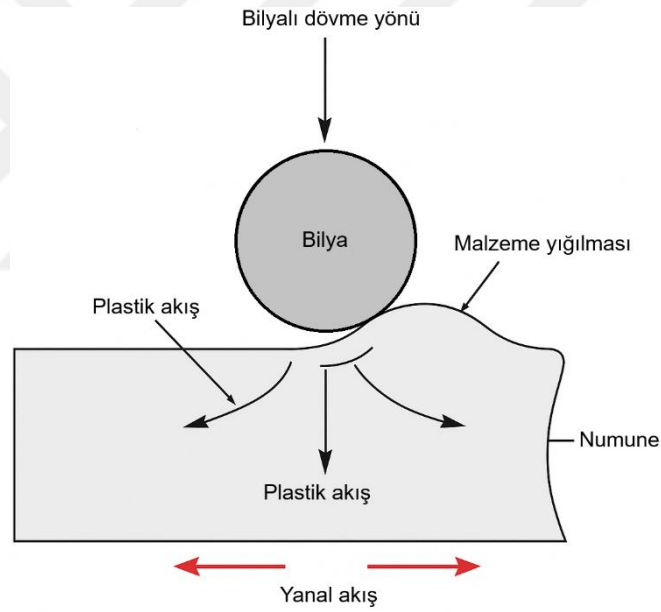
Şekil 5.10. Bilyalı dövme işlemi boyunca yüzey pürüzlülük değişiminin şematik gösterimi.

6061-T6 alüminyum alaşımına %100, %200, %500 ve %1500 gibi artan kaplama oranlarında bilyalı dövme uygulandığında, özellikle numune kenarlarında Şekil 5.11’de gösterildiği gibi belirgin bir malzeme yığılması (pile-up) olayı gözlemlenmiştir. Bu etki, kaplama oranı arttıkça daha belirgin hâle gelmiş ve tekrarlayan darbelerin neden olduğu birikimli plastik deformasyonla ilişkilendirilmiştir. Bilyalı dövme işlemi, yüksek hızlı

küresel bilyaların yüzeye çarpmasıyla basma tipi artık gerilmeler oluşturan bir yüzey işlemidir. Düşük kaplama oranlarında, darbe enerjisi yüzeye daha seyrek dağıldığı için deformasyon lokalize kalır. Ancak %500 ve %1500 gibi yüksek kaplama oranlarında, aynı yüzey alanı birçok kez darbe alır ve bu durum, plastik deformasyonun hem şiddetini hem de yüzey genelindeki homojenliğini önemli ölçüde artırır. Kaplama oranı arttıkça, yüzey yakınında biriken deformasyon daha da artar. Sürekli soğuk şekil değiştirme etkisiyle malzeme içinde basma gerilmeleri ve plastik akma meydana gelir, bu da yatay malzeme yer değiştirmesine neden olur. Numunenin orta bölgeleri geometrik olarak daha kısıtlı olduğundan, deformasyona uğrayan malzeme, mekanik direncin daha düşük olduğu serbest kenarlara doğru akma eğilimi gösterir. Bu yanıl malzeme akışı, kenar bölgelerde çıplak gözle bile görülebilecek yükseltilmiş alanlar şeklinde malzeme birikimine neden olur. Mekanik açıdan bakıldığında, bu durum, numune çevresinde geometrik kısıtlamaların eksikliği ve homojen olmayan gerilme dağılımı nedeniyle yüksek döngülü bilyalı dövme yükleri altında dışı doğru malzeme göçünü kolaylaştırır. Ayrıca, 6061-T6 alüminyum alaşımının yüksek süneklik ve göreceli olarak düşük akma dayanımı, bu tür yüzey deformasyon davranışlarına karşı daha hassas olmasına neden olmaktadır. Bu etki, şiddetli plastik deformasyon (SPD) tekniklerinde gözlemlenen duruma benzer; burada, kısıtlanmış bölgelerde yoğun deformasyon oluşurken, serbest yüzeyler malzemenin dışı doğru akmasına imkân tanır. Malzeme akışı ve pile-up mekanizmasına dair şematik açıklama Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Özetle, yüksek kaplama oranlarında bilyalı dövme uygulanmış 6061-T6 numunelerinde kenar bölgelerinde gözlemlenen malzeme yığılması, esas olarak aşırı plastik deformasyon, gerilme gradyanları ve kenarlarda geometrik sınırlamanın olmamasından kaynaklanan yanıl akma ve malzeme birikimi sonucu meydana gelmektedir.



Şekil 5.11. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait makro görüntüler. Numunenin üst kenarı boyunca malzeme akışını göstermektedir.

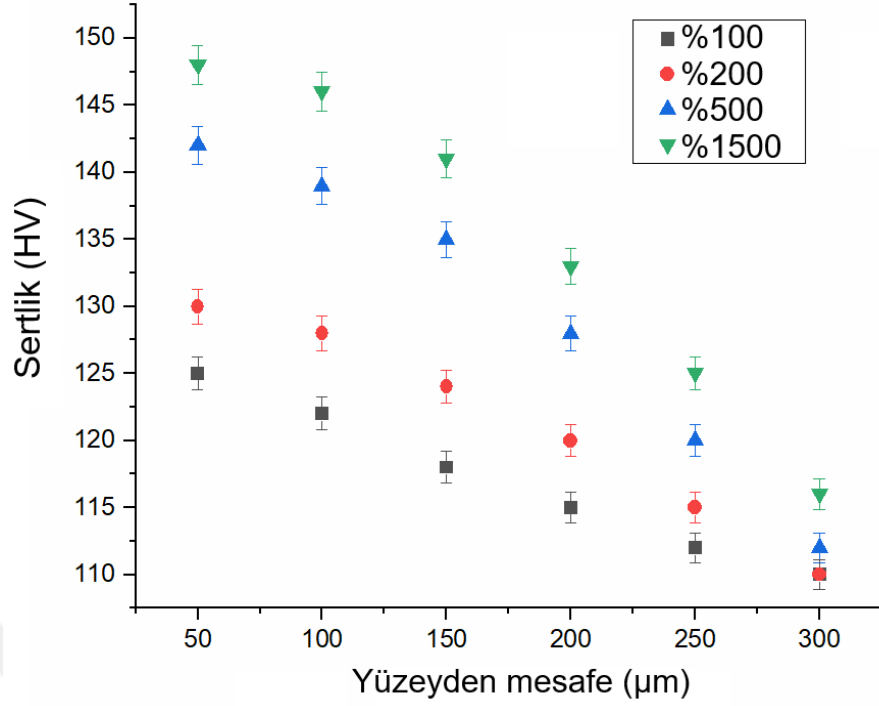


Şekil 5.12. Malzeme yığılması ve malzeme akış mekanizmasının bilyalı dövme işlemi boyunca gösterimi.

5.2. Sertlik Sonuçları

Her numune için en az üç adet sertlik ölçümü gerçekleştirilmiş olup, ortalama sertlik değerleri Şekil 5.13'te sunulmuştur. Yüzey sertliği sonuçları, test edilen beş numune arasında belirgin bir eğilim ortaya koymaktadır: işlem görmemiş referans numunesi en düşük sertlik değerini sergilemiş ve bu durum, yüzeyde herhangi bir soğuk şekillendirme veya basma tipi artık gerilmenin oluşmadığını doğrulamıştır. SP100 numunesinde, yüzeyde başlayan şekil değişimi sertleşmesini (strain hardening) işaret

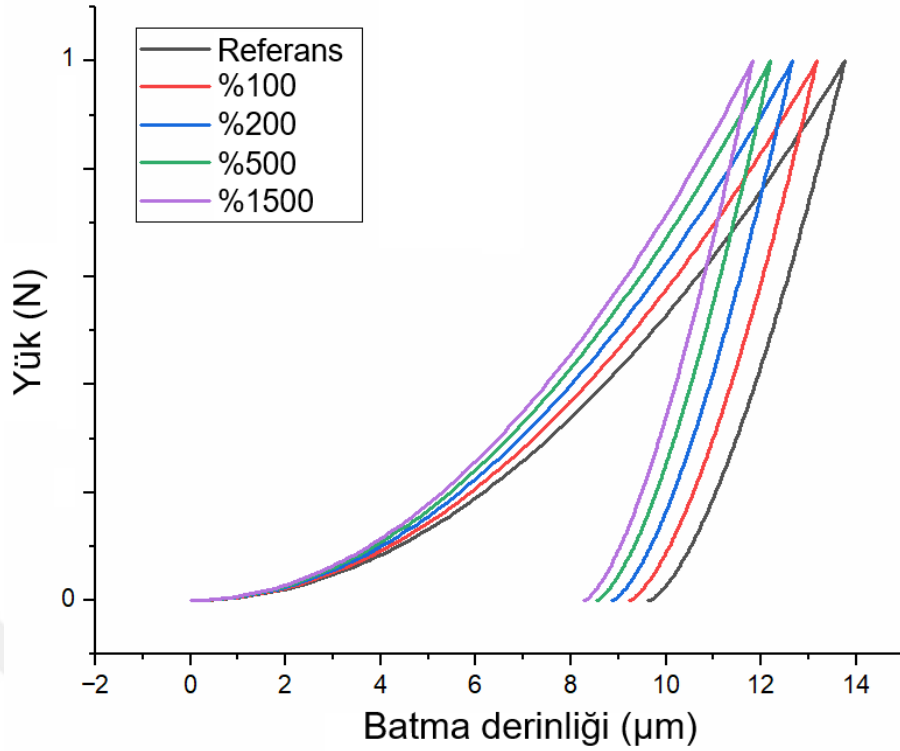
eden orta düzeyde bir sertlik artışı gözlenmiştir. Kaplama oranı %200 ve ardından %500'e çıkarıldığında, sertlik değerleri artmaya devam etmiş; bu da artan darbe yoğunluğu ve plastik deformasyonun kümülatif etkilerini yansıtmış, yüzeye yakın bölgelerde tane incelmesi ve dislokasyon yoğunluğunun yükseldiğini düşündürmüştür. Kesit alınan numune yüzeylerinde, tane incelmesinin kaplama oranına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Hall-Petch ilişkisine göre, tane incelmesi sertlik, çekme dayanımı ve yorulma direnci gibi mekanik özelliklerin iyileşmesine yol açmaktadır [22,23]. Mekanik özelliklerdeki bu artışın bir diğer nedeni de, tane sınırlarının artmasıyla dislokasyon hareketlerinin engellenmesidir [15,17,24,25]. En yüksek sertlik değeri SP500 numunesinde kaydedilmiş ve mevcut bilyalı dövme parametreleri altında bu kaplama oranının mekanik dayanım açısından en uygun koşul olduğunu düşündürmüştür. İlginç bir şekilde, SP1500 numunesi SP500'e kıyasla anlamlı bir sertlik artışı göstermemiştir. Bu durum, yüzey doygunluğu (surface saturation) etkisiyle açıklanabilir; bu noktada yapılan ek darbe uygulamaları, numunenin sertleşmesine anlamlı bir katkı sağlamamakta ve hatta yerel termal yumuşama ya da yüzey altı mikroyapısal gevşeme gibi durumlara neden olabilmektedir. Genel olarak, bu sonuçlar, bilyalı dövme kaplama oranı ile yüzey sertleşmesi arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Ancak %500 kaplama oranının ötesinde, sertlik değerlerinde kayda değer bir artış gözlemlenmemiştir.



Şekil 5.13. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait yüzeyden içeriye sertlik değişimi.

5.3. Kalıntı Gerilme Sonuçları

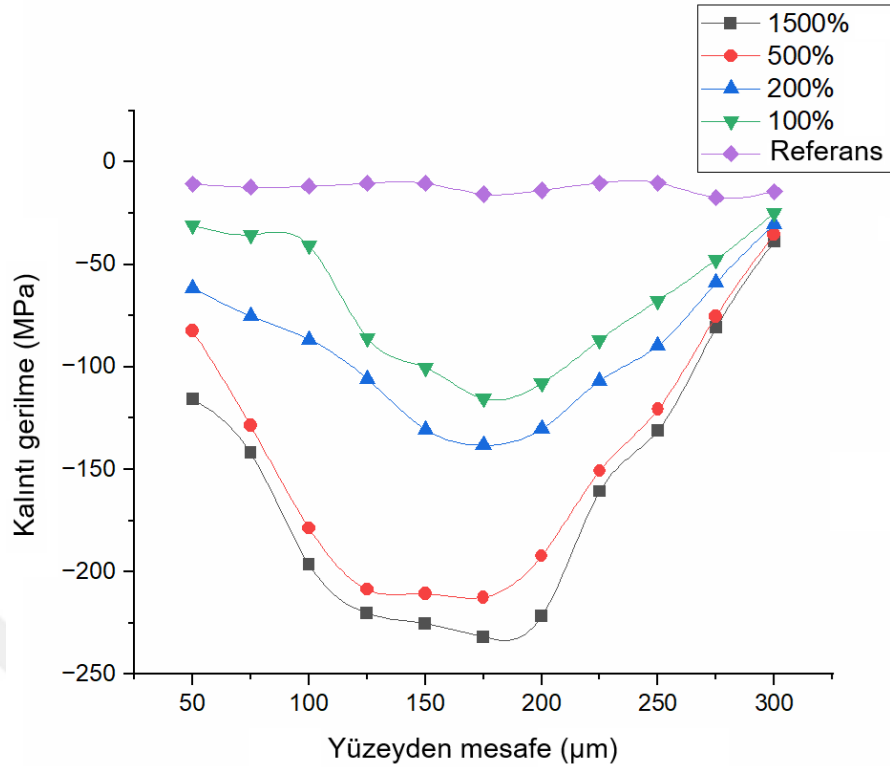
6061-T6 alüminyum alaşımının artık gerilme davranışı, indentasyon yöntemiyle kapsamlı şekilde analiz edilmiştir. Ölçümler, yüzey işlemi uygulanmamış bir referans numunesi ile %100 (SP100), %200 (SP200), %500 (SP500) ve %1500 (SP1500) kaplama oranlarında bilyalı dövme uygulanmış dört numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Referans, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait yükleme-boşaltma eğrileri, temsili olarak Şekil 5.14'te sunulmuştur.



Şekil 5.14. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait temsili yüklem-boşalma eğrileri.

Bu çalışmanın amacı, bilyalı dövme yoğunluğundaki artışın, oluşan basma tipi kalıntı gerilmelerin büyüklüğü, derinliği ve dağılımı üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Yüzeyden başlayarak 300 μm derinliğe kadar, 25 μm aralıklarla ölçülen artık gerilme değerleri tüm numuneler için Şekil 5.15'te gösterilmiştir. İlk olarak dikkat çeken önemli bir bulgu, Ravnikar ve ark. tarafından 6082-T651 alüminyum alaşımı için elde edilen artık gerilme profilinin bu çalışmayla oldukça benzerlik göstermesidir [15]. Sref numunesi, ölçülen tüm derinlik boyunca -10 ila -17 MPa arasında değişen, düşük büyüklükte ve neredeyse homojen artık gerilmeler sergilemiştir. Bu düşük değerler, malzemenin üretim süreci ve yüzey koşullarına bağlı olarak oluşmuş olabilir; ekstrüzyon sonrası çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma (T6 tavı) gibi işlemler sırasında oluşan termal gradyanlar ve soğuma farklılıkları iç gerilmelere yol açabilir. Ayrıca, kesme, taşlama ve parlatma gibi yüzey hazırlık işlemleri, yüzeye yakın bölgelerde lokal plastik deformasyon oluşturarak sıg basma gerilmeleri meydana getirebilir. Bilyalı dövme uygulanmamış metallerde gözlenen bu tür gerilmeler, imalat ve yüzey işleme sırasında içsel gerilmelerin yeniden dağılımı sonucu oluşan yaygın bir durumdur. Bu nedenle, referans numunedeki bu düşük seviyedeki basma gerilmeleri, mekanik yüzey işlemlerinin katkısını değerlendirmek için temel referans olarak kabul edilmelidir. Buna karşın, bilyalı dövme uygulanan

numunelerde, yüksek hızlı bilya çarpmalarının oluşturduğu yüzey plastik deformasyonuna bağlı olarak hem basma gerilmesi büyüklüğünde hem de derinliğinde belirgin artışlar gözlenmiştir. SP100 numunesi yaklaşık 175 µm derinlikte -115 MPa ile maksimum basma gerilmesine ulaşmış, bu noktadan itibaren hem yüzeye hem de daha derin bölgelere doğru gerilme miktarı azalmıştır. SP200, 175 µm derinlikte -138 MPa seviyesine çıkarak darbe yoğunluğunun iki katına çıkarılmasının, yüzey altı deformasyon ve gerilme birikimini artırdığını göstermiştir. SP500, 175 µm derinlikte -212 MPa ile önemli bir artış göstermiş ve derine nüfuz eden bir plastik deformasyon bölgesi oluşturmuştur. SP1500, yine 175 µm derinlikte yaklaşık -231 MPa ile en yüksek gerilme değerine ulaşmış ve ölçüm yapılan tüm derinlik boyunca basma gerilmesini muhafaza etmiştir. Ancak, SP500 ile SP1500 arasındaki fark, kaplama oranı üç kat artmasına rağmen görece küçük kalmış; bu durum, belirli bir eşik değerinden sonra artık gerilme artışının sınırlı kaldığını ve bu nedenle marjinal değişimin azaldığını göstermektedir. Bu plato etkisi, mekanik doygunluk, darbe alanlarının çakışması ya da yerel gerilme gevşemesi gibi etkenlerden kaynaklanarak, dislokasyon birikimini sınırlayabilir ya da gerilmenin yeniden dağılımına neden olabilir. Ayrıca, SP500 ve SP1500 numunelerinin artık gerilme profilleri, 125 µm derinlikten itibaren çok benzer bir eğilim göstermiş ve yüzey altındaki gerilme durumlarının birbirine yakın olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bu bulgular, bilyalı dövme uygulamalarında kaplama oranının artmasının yüzey basma gerilmelerini ve mekanik performansı artırdığını; ancak aşırı yüksek kaplama oranlarının, enerji kullanımını artırmakla birlikte orantılı bir fayda sağlamadığını göstermektedir. Bu nedenle, yaklaşık %500 kaplama oranı, etkili gerilme üretimi ile işlem verimliliği arasında optimal bir denge sağlayan bir değer olarak öne çıkmaktadır. Derinlik-gerilme verileri yalnızca yüzey işlemlerine karşı malzemenin tepkisini açıklamakla kalmamakta, aynı zamanda yorulma ömrü, çatlak başlatma direnci ve genel yüzey bütünlüğü gibi kritik özelliklerin öngörülmesinde de önemli rol oynamaktadır; özellikle hafif, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarının zorlu yapısal uygulamalarda kullanıldığı alanlar için bu veriler büyük önem taşımaktadır.

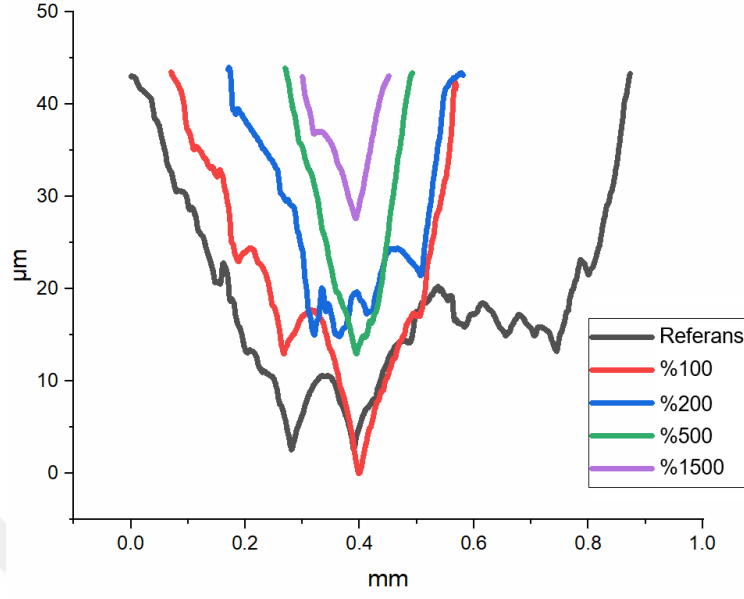


Şekil 5.15. SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait kalıntı gerilme değerleri.

5.4. Aşınma Testi Sonuçları

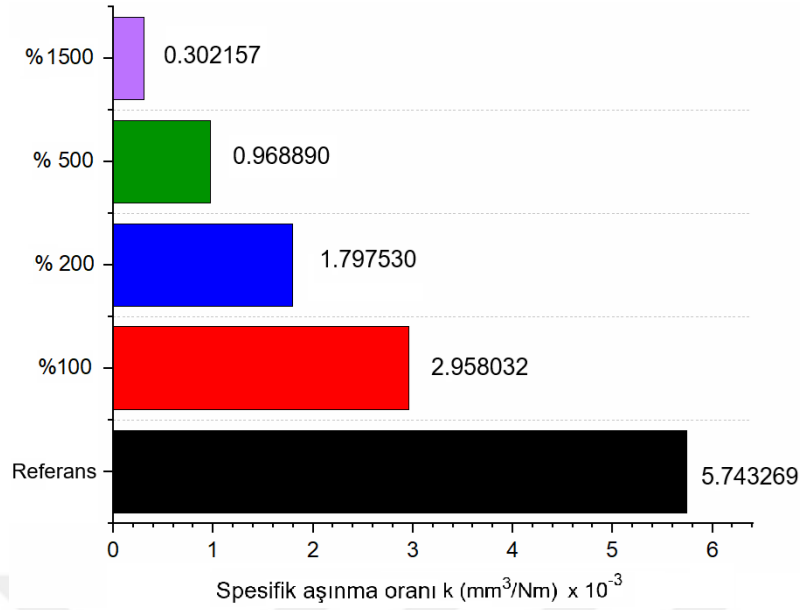
Plaka üzeri bilya aşınma (ball-on-plate) testleri, CSM aşınma test cihazı kullanılarak kuru kayma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait aşınma izi profilleri Şekil 5.16'da sunulmuştur.

	Referans	100 %	200 %	500 %	1500 %
Aşınma alanı μm^2	21537.26	11092.62	6740.74	3663.34	1133.09



Şekil 5.16. Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait aşınma izleri.

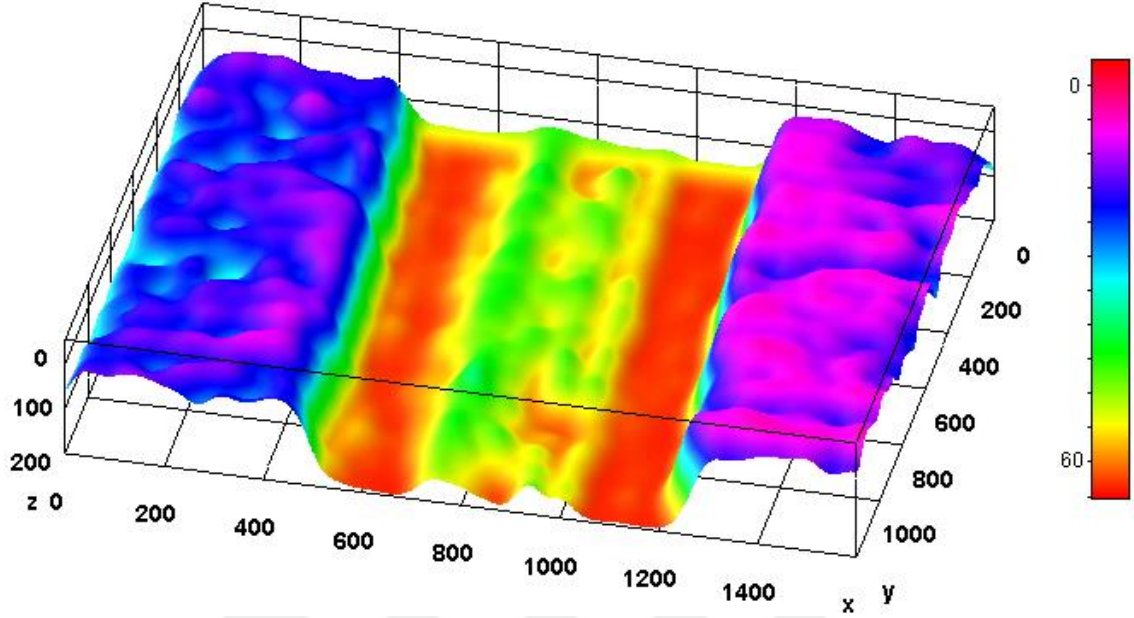
Bu profiller, OriginLab yazılımına aktarılmış ve her bir aşınmış kesitin alanı entegre edilerek toplam aşınma alanı hesaplanmıştır; elde edilen veriler Şekil 5.16'nın üst kısmında tablo halinde gösterilmiştir. Son olarak, her bir numune için Archard denklemini esas alınarak özgül aşınma oranları (k) ($\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) hesaplanmış ve Şekil 5.17'de sunulmuştur.



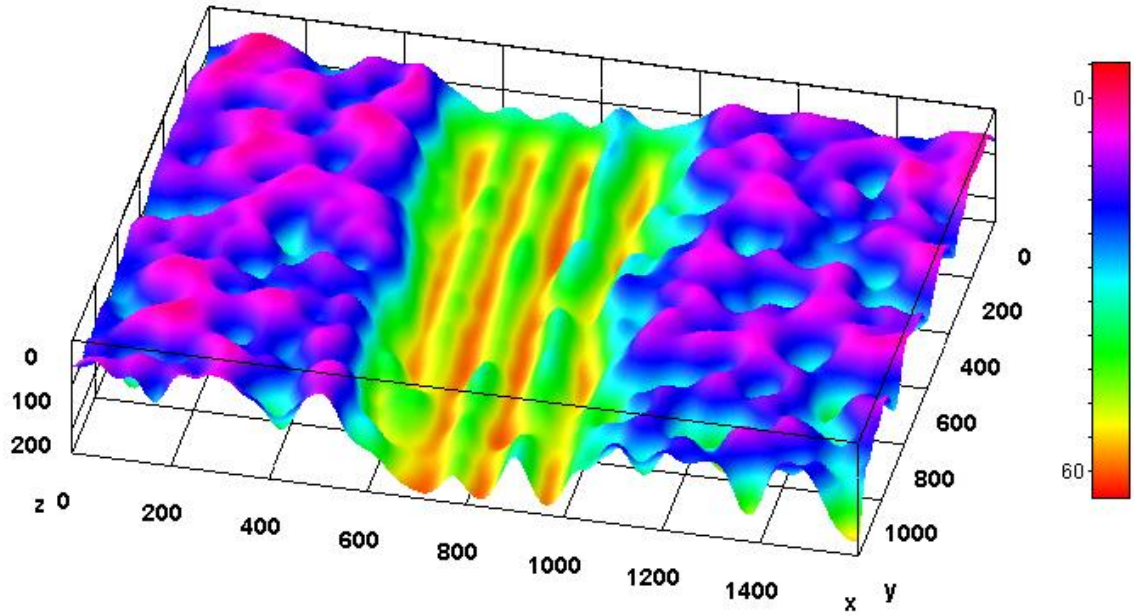
Şekil 5.17. Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait hesaplanmış spesifik aşınma testleri.

Özgül aşınma oranları dikkate alınarak yük ve mesafe gibi test parametrelerinin etkisi ortadan kaldırılmış ve sonuçlar daha karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Aşınma izi profilleri ve özgül aşınma oranlarına göre, beklendiği üzere en yüksek aşınma alanı ve en yüksek özgül aşınma oranı, işlem görmemiş olan Sref numunesinde gözlemlenmiştir. Sref numunesinin sertlik değeri yaklaşık 112 HV olup, test edilen numuneler arasındaki en düşük sertlik değerine sahip olduğu için en yüksek özgül aşınma oranına sahip olması beklenen bir sonuçtur. Bilyalı dövme kaplama oranı arttıkça, yüzeye yakın bölgelerde sertlikte kademeli ve sürekli bir artış gözlenmiştir. Bu artışa eşlik eden artık gerilmelerdeki yüzeyden içeriye doğru kademeli yükselme, sertlik artışıyla birlikte aşınma direncindeki belirgin iyileşmeye önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Bu nedenle özgül aşınma oranında bir azalma görülmüş, bu da sertlik ile özgül aşınma oranı arasında ters orantılı bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur [17,26,27]. Aşınma izi profilleri ve özgül aşınma oranlarına göre, SP1500 numunesinin aşınma direncinin, işlem görmemiş Sref numunesine kıyasla yaklaşık 19 kat arttığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, bilyalı dövme işleminden sonra SP100, SP200 ve SP500 numunelerinin aşınma dirençleri Sref numunesine kıyasla sırasıyla yaklaşık 1.94, 3.2 ve 5.97 kat artmıştır. Aşınma hacmi farkını daha belirgin göstermek amacıyla Şekil 5.18–Şekil 5.22’de her bir numuneye ait 3D yüzey topografyası sunulmuştur. Üç boyutlu yüzey topografyası, en yüksek aşınma hacminin Sref numunesinde gerçekleştiğini açıkça ortaya koymuştur. Bilyalı dövme

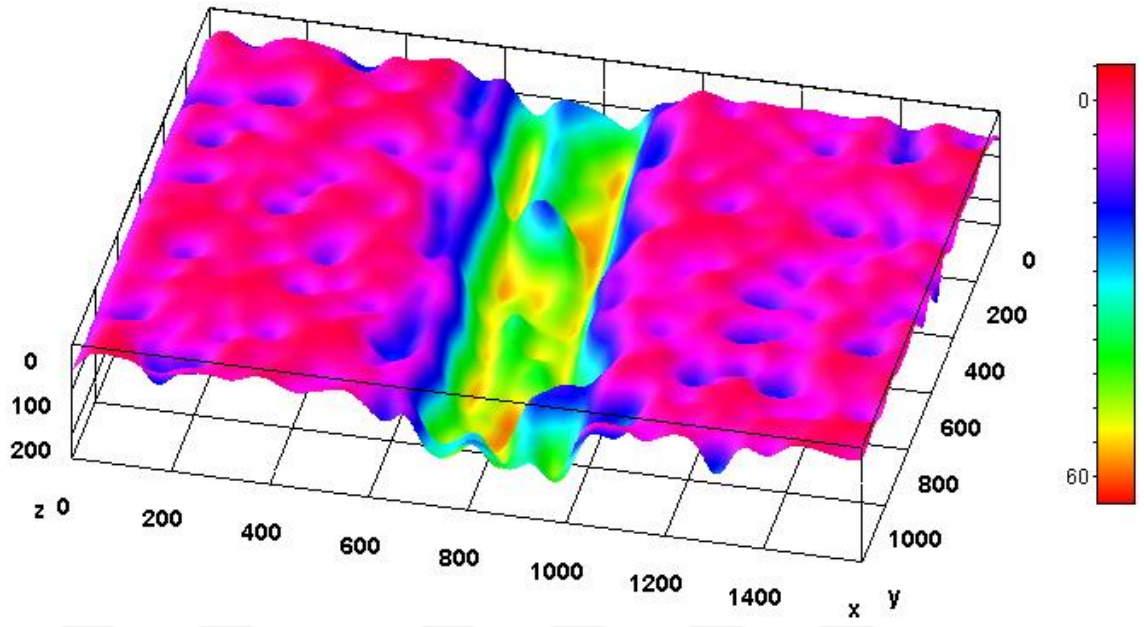
kaplama oranı arttıkça, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerinde doğrusal aşınma izlerinin genişliği ve derinliği kademeli olarak azalmıştır.



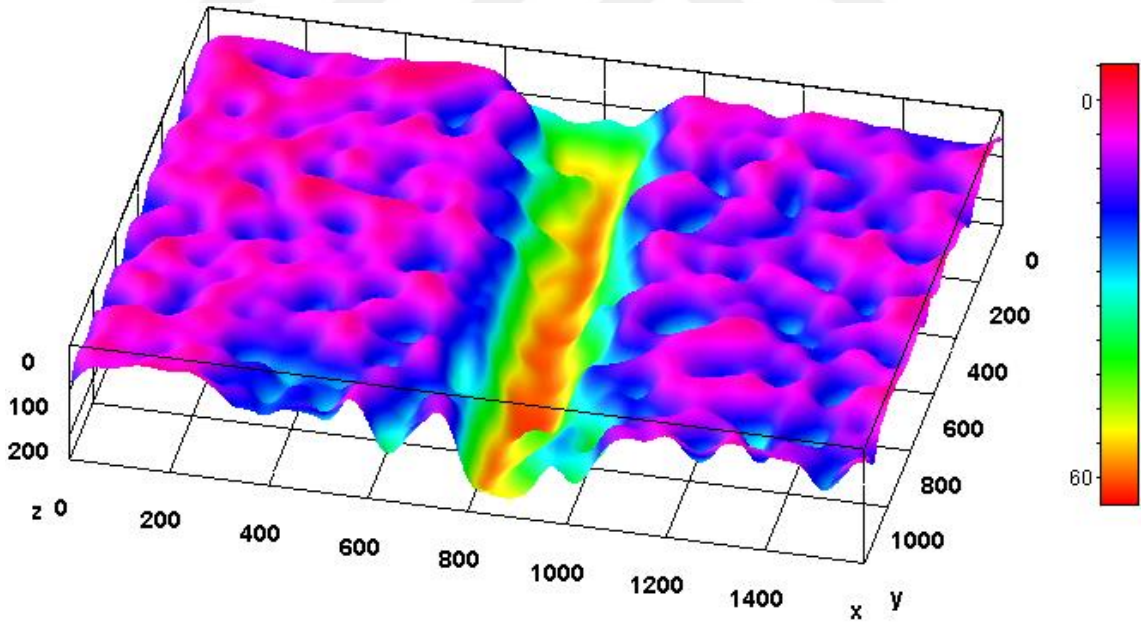
Şekil 5.18. Aşınma deneyi sonrası Sref numunesine ait 3D yüzey topografisi.



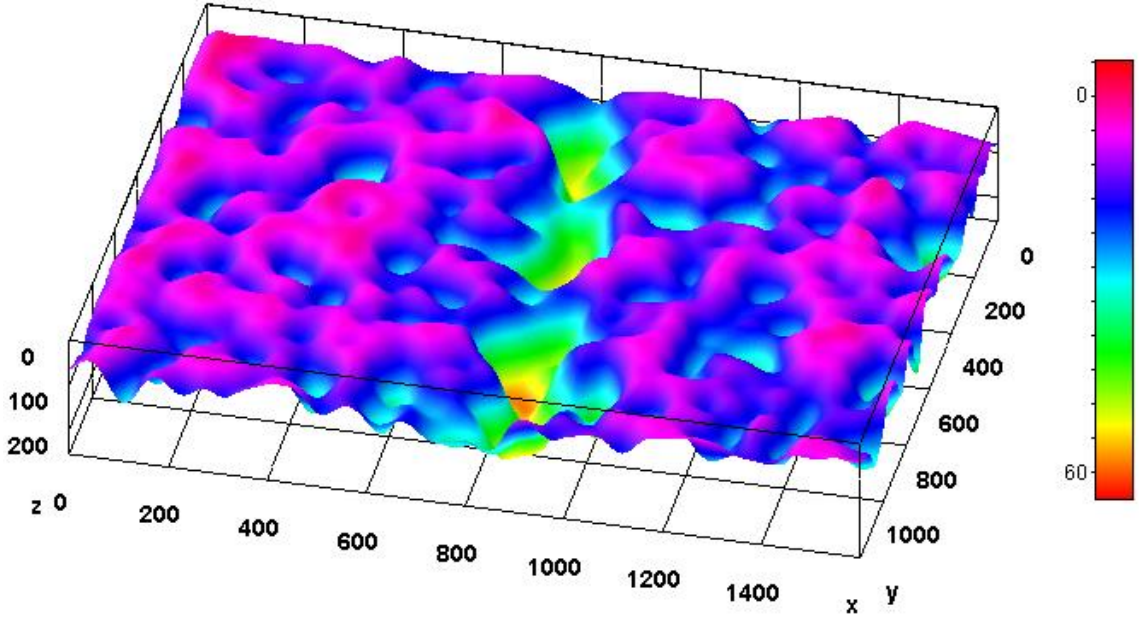
Şekil 5.19. Aşınma deneyi sonrası SP100 numunesine ait 3D yüzey topografisi.



Şekil 5.20. Aşınma deneyi sonrası SP200 numunesine ait 3D yüzey topografisi.

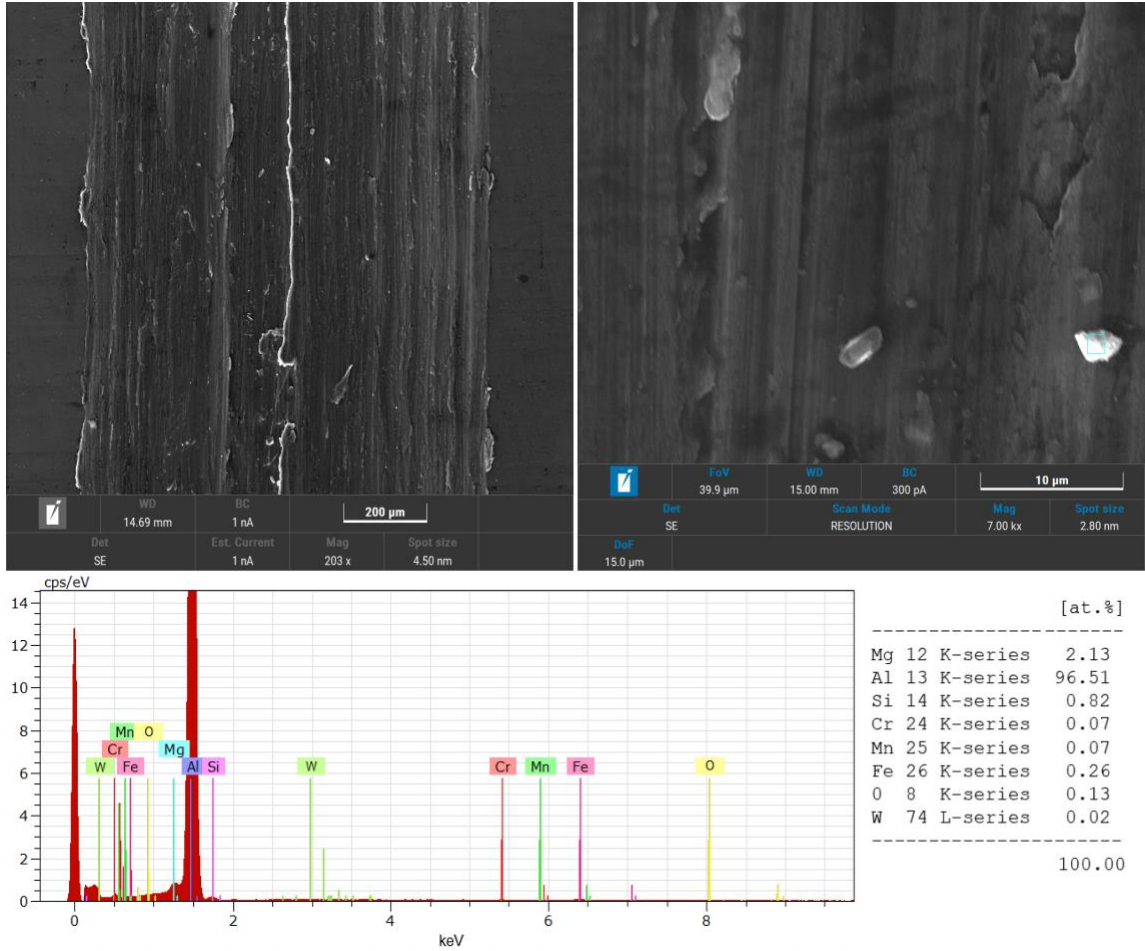


Şekil 5.21. Aşınma deneyi sonrası SP500 numunesine ait 3D yüzey topografisi.



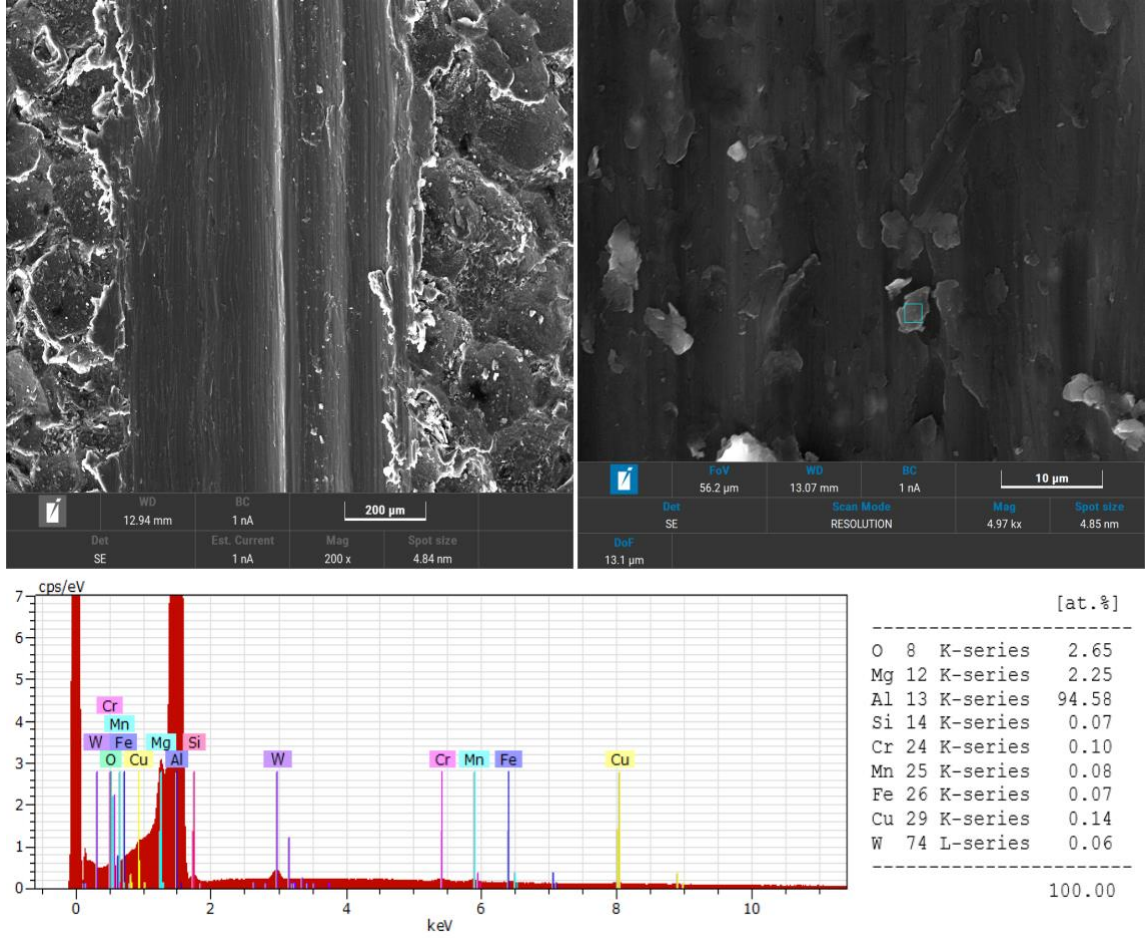
Şekil 5.22. Aşınma deneyi sonrası SP1500 numunesine ait 3D yüzey topografisi.

Şekil 5.23, işlem görmemiş 6061-T6 alüminyum alaşımına (Sref) ait aşınmış yüzeyi göstermekte olup, plaka üzeri bilay aşınma testlerinde görülebilecek plastik akma, adhezyon aşınması, yırtılma (ploughing) ve birikmiş aşınma kalıntıları gibi aşınma mekanizmalarının açıkça var olduğu gözlemlenmektedir. Plastik akma, kayma yönüyle hizalanmış uzamış yüzey bozulmalarıyla kendini göstermekte ve düşük sertlik nedeniyle yüzeyde önemli derecede yumuşama ve deformasyonun oluştuğunu işaret etmektedir. Adhezyon aşınması ise, lokal malzeme transferi ve kopma bölgeleriyle tanımlanmakta; alüminyum yüzeyi ile WC-Co karşı yüzey arasında oluşan güçlü ara yüzey bağları, mikro ölçekli yırtılmalara ve malzeme kaybına yol açmıştır. Kayma yönüne paralel uzanan yırtılma izleri ve derin oluklar, sert karşı yüzeyin daha yumuşak matris üzerinde yaptığı kazıma etkisiyle oluşan abrasif etkileşimi göstermektedir. Ayrıca yüzey boyunca dağılmış aşınma kalıntıları, tekrarlanan yüzey kırılmaları ve parçacık birikimini işaret etmekte olup, bu parçacıklar daha sonra üçüncü cisim aşındırıcıları gibi davranarak aşınmayı daha da artırmaktadır. Bu gözlemler, işlem görmemiş numunenin kuru kayma koşullarında ciddi seviyede hem adhezyon hem de abrasif aşınmaya maruz kaldığını doğrulamaktadır. Yapılan EDS analizine göre, yüzeyde oksitler ve wolfram (tungsten) tespit edilmiş olup, bu durum aşınma testleri sırasında WC-Co karşı yüzeyinden numune yüzeyine malzeme transferi olduğunu göstermektedir. Oksitlerin varlığı ise, sürtünme kaynaklı ısınmanın neden olduğu yüzey oksidasyonuna işaret etmektedir.



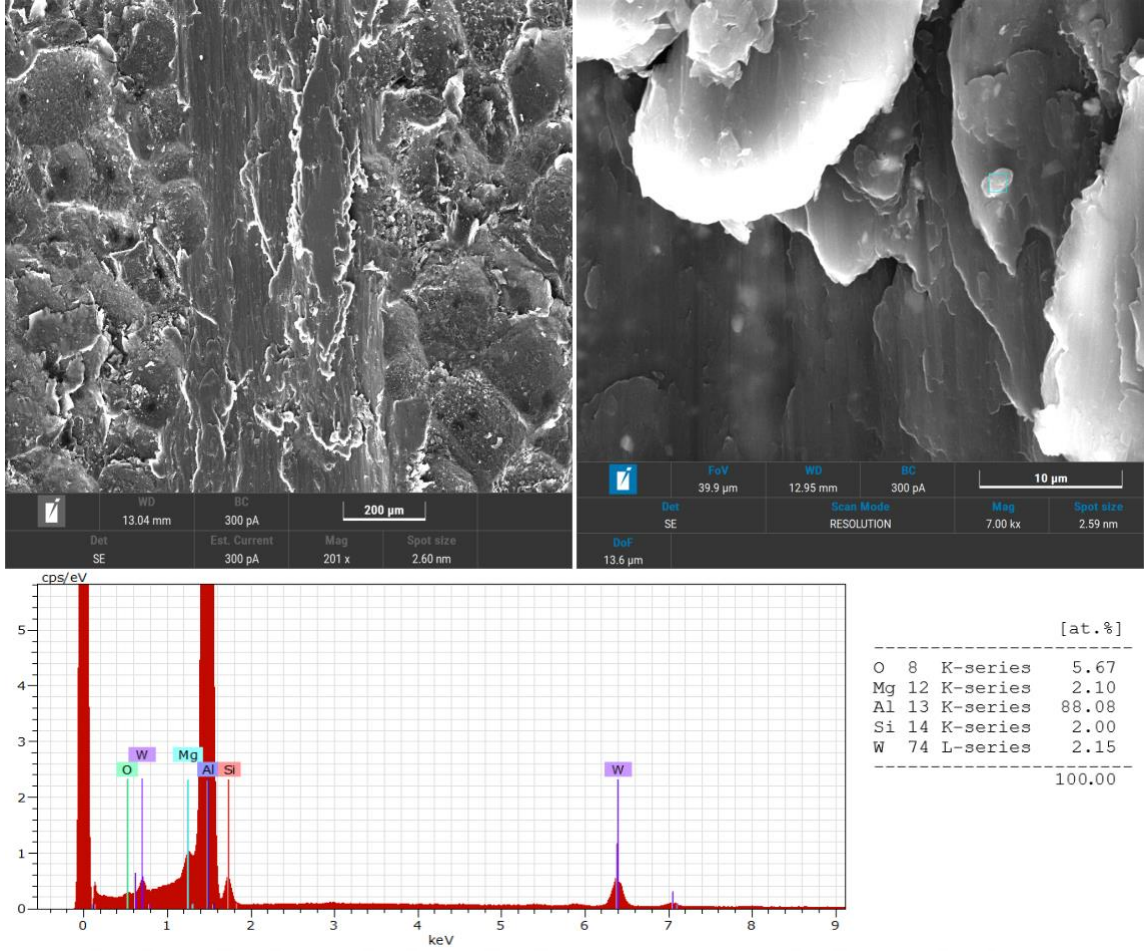
Şekil 5.23. Sref numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.

Şekil 5.24'te, SP100 numunesine ait SEM görüntüsü ve EDS analiz sonuçları sunulmuştur. Aşınma izi kenarında ve yüzey boyunca görülen yayılma (smearing) bölgeleri, yüzey ile WC-Co karşı yüzeyi arasında yerel adhezyon oluştuğunu göstermekte olup, bu durum kayma sırasında adhezyon aşınması mekanizmalarının etkili olduğunu işaret etmektedir. Bazı bölgelerde gözlenen ince çatlak benzeri yapılar ve küçük yırtılmalar, büyük olasılıkla tekrarlayan mekanik temaslar ve gerilme birikimlerinin neden olduğu deformasyonlar sonucunda oluşmuştur. Aşınma izlerinin belirli bir doğrultuda hizalanmış olması, git-gel (reciprocating) kayma hareketinin yönünü açıkça göstermektedir. Bazı bölgelerde daha belirgin hasar izleri gözlenmiş olup, bu durum yüzeydeki mikroyapısal düzensizlikler veya sertlik farklılıklarından kaynaklanmış olabilir. Yapılan EDS analizinde, yüzeyde oksit ve wolfram (W) tespit edilmiş olup, bu da aşınma sırasında WC-Co bilyasından test numunesine malzeme transferi gerçekleştiğini göstermektedir.



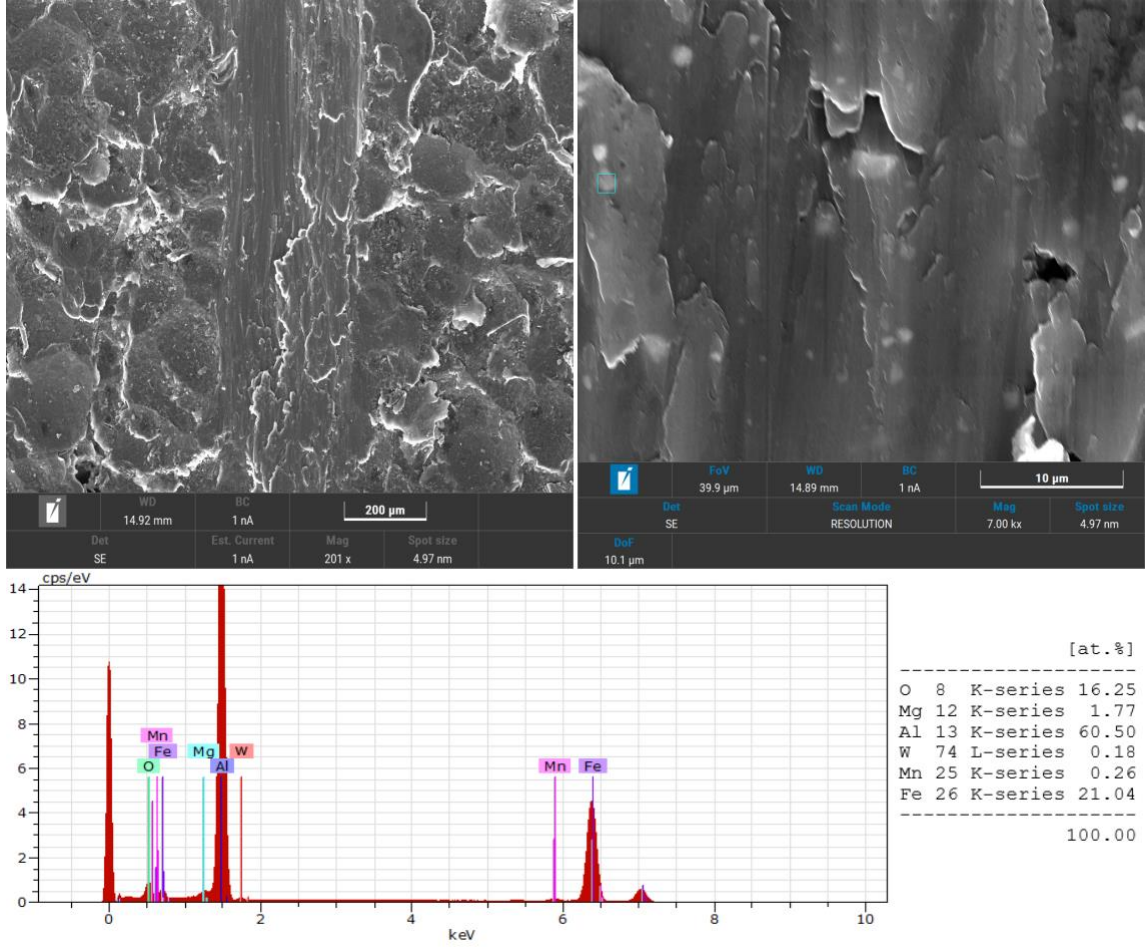
Şekil 5.24. SP100 numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.

Şekil 5.25'te gösterildiği üzere, SP200 numunesinde daha fazla yayılma (smearing) ve belirgin plastik deformasyon gözlemlenmiştir. Bu durum, numune ile WC-Co bilya arasındaki şiddetli yüzey etkileşimine bağlanmıştır. Karşılıklı kayma hareketi sırasında yüzeyde paralel oluk oluşumları tespit edilmiştir. Ayrıca, yerel gevreklikten kaynaklanabileceği düşünülen keskin kenarlı yüzey kırıkları oluşmuştur. EDS analizinde WC-Co bilyasından malzeme transferi gerçekleştiği belirlenmiş ve buna bağlı olarak yüzeyde wolfram (W) tespit edilmiştir.



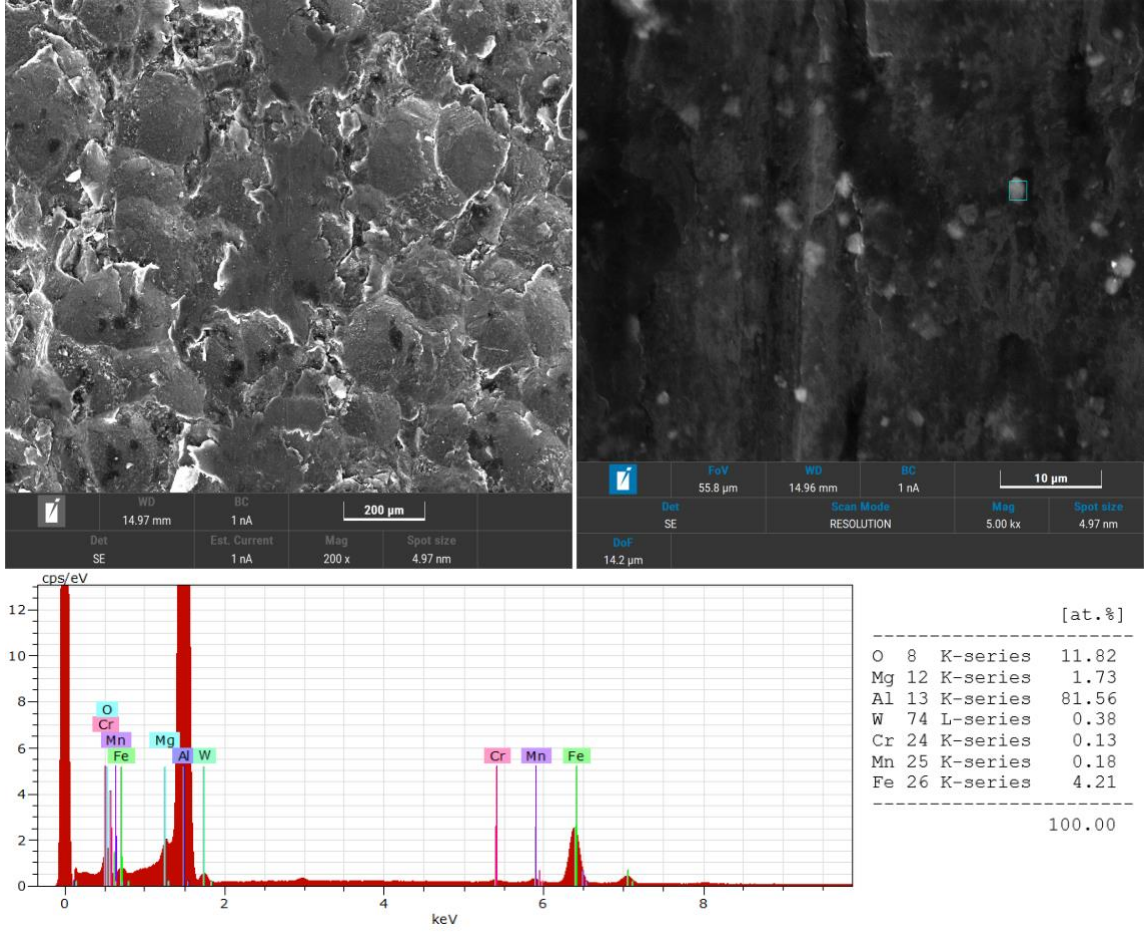
Şekil 5.25. SP200 numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.

Şekil 5.26’da gösterildiği üzere, SP500 numunesinde gözlemlenen aşınma izi, SP200 numunesine kıyasla daha düzgün ve daha az aşınmış görünmektedir. Bu durum, artan kaplama oranı sayesinde yüzey sertliğinin ve artık gerilmelerin yükselmesiyle plastik deformasyonun sınırlandığını göstermektedir. Paralel oluklar hâlâ mevcut olsada bunlar daha dar ve daha düzgün yapıda olup, aşınma mekanizmasının abrazif türüne dönüştüğünü düşündürmektedir. EDS spektrumunda wolfram (W) pikleri tespit edilmiş, bu da WC-Co bilyasından yüzeye malzeme transferi olduğunu ortaya koymuştur. Soğuk şekil değişimiyle sertleşmiş yüzey tabakasının oluşması, aşınma direncinin artmasına katkı sağlamıştır.



Şekil 5.26. SP500 numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.

Şekil 5.27, tüm numuneler arasında en yüksek aşınma direncine sahip olan SP1500 numunesine ait SEM ve EDS analizlerini sunmaktadır. SP1500 numunesi, en yüksek kaplama oranına sahip olduğundan, aşırı bilyalı dövme uygulaması yüzeyde fazla darbe enerjisi ve birikimli şekil değişimi oluşturmuştur. Diğer numunelerle karşılaştırıldığında, SP1500 numunesinde aşınma izi en dar şekilde gözlemlenmiş olup, bu durum 3D yüzey topografyası ile de doğrulanmıştır. Yüzeyde aşınma oluklarına rastlanmamış, baskın aşınma belirtisi olarak yalnızca sınırlı düzeyde yayılma (smearing) gözlemlenmiştir; bu da aşınma mekanizmasının abrazif aşınmadan adhezyon aşınmasına dönüştüğünü göstermektedir. EDS analizinde wolfram (W) elementine hâlen rastlanmış olup, bu da WC-Co bilyasinden numune yüzeyine malzeme transferi gerçekleştiğini göstermektedir.



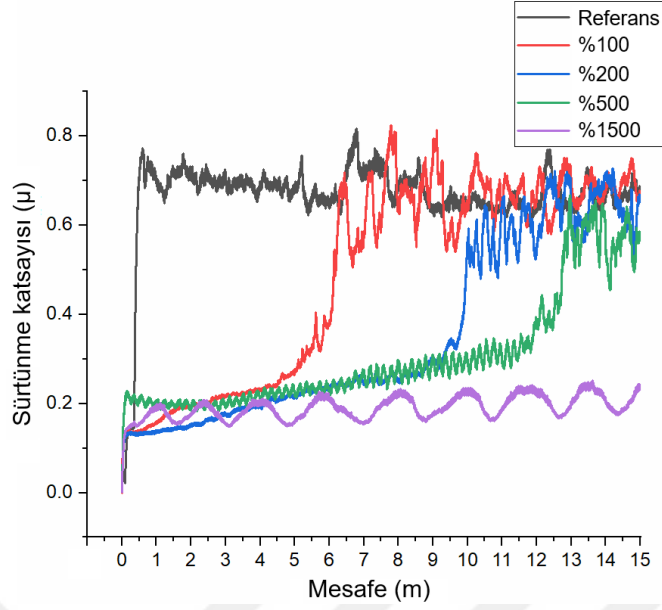
Şekil 5.27. SP1500 numunesine ait aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizi.

SEM görüntüleriyle birlikte elde edilen EDS analizlerinin genel değerlendirmesi sonucunda, ana aşınma mekanizmalarının adhezif ve abrazif aşınma ile bunların kombinasyonları olduğu belirlenmiştir. Bir diğer önemli bulgu ise, EDS analizlerine göre numune yüzeyinde tespit edilen birincil çökelti fazının büyük olasılıkla Mg_2Si (magnezyum silisit) olduğudur. Bu çökelti, 6061 alüminyum alaşımları için temel sertleştirici faz olup, sertlik, çekme dayanımı, yorulma ve aşınma direncinin artışında önemli rol oynamaktadır [28,29]. Bilyalı dövme işlemi sonrasında Mg_2Si çökeltilerinin daha homojen bir şekilde dağıldığı ve bu durumun dislokasyon hareketlerini engelleyerek numunenin sertlik ve aşınma direncini artırdığı düşünülmektedir [17]. Ayrıca, EDS analizlerinde tespit edilen oksijen varlığı, yüzeyde oluşan ince oksit tabakasının aşınma ve korozyon direnci sağladığını göstermektedir.

Tüm incelenen numuneler için sürtünme katsayısının değişimi, Şekil 5.28'de gösterildiği üzere, klasik aşınma evreleri olan ilk çalışma (run-in) ve kararlı durum

(steady state) aşamalarıyla uyumlu belirgin tribolojik davranış kalıplarını ortaya koymuştur. İşlem görmemiş referans numunesi, test edilen tüm gruplar arasında en yüksek ve en dengesiz sürtünme davranışını sergilemiş, sürtünme katsayısı değeri uzun ve kararsız bir ilk çalışma evresi sonrasında keskin dalgalanmalarla yaklaşık 0.67'ye yükselmiş ve bu davranış literatürde de benzer şekilde rapor edilmiştir [30]. Bu durum, 6061-T6 alüminyumun doğası gereği yumuşak ve sünek yapısına bağlanmakta; güçlü adhezyon etkileşimleri, geniş plastik deformasyonlar ve koruyucu bir tribo tabakasının oluşmaması nedeniyle doğrudan metal-metal teması gerçekleşmiştir. Kararlı bir aşama oluşmamış ve yerli Al_2O_3 tabakasının sürekli olarak bozulması ile yüzeyin taze alüminyuma maruz kalması, aşınma oranının sürekli artmasına yol açmıştır. Bu oksit tabakası başlangıçta mevcut olsada, yük altında hızla kırılarak tekrar tekrar çatlama ve yeniden oluşma döngüsüne girmiş ve bu da dengesiz tribolojik davranışa katkıda bulunmuştur. Sonuç olarak, yüzey bütünlüğü tamamen bozulmuş, bağlanma-kopma olayları ve malzeme transferi sürtünme sürecine hâkim olmuştur. SP100 numunesi, işlem görmemiş numuneye kıyasla daha düşük başlangıç sürtünme katsayısı değeriyle iyileştirilmiş bir tribolojik yanıt sergilemiş ve bu azalma, hafif yüzey sertleşmesi, artan basma tipi artık gerilmeler ve gerçek temas alanını azaltarak adhezyon aşınmasının şiddetini sınırlayan mikro çukurcukların varlığına bağlanmıştır. İlk 5 metre boyunca sürtünme katsayısı değeri oldukça sabit kalmış, bu da aşınma ve oksit film bozulmasına karşı başlangıç direncine işaret etmiştir; ancak bu mesafenin ötesinde sürtünme katsayısı değerinde belirgin bir artış gözlenmiş ve bu da yüzey yorulmasının ve yüzey altı desteğin yetersiz kalmasının başladığını göstermiştir. Bilyalı dövme işleminin oluşturduğu güçlendirme etkisi başlangıçta oksit film bozulmasını geciktirmiş, sürekli yük altında bu bariyerler aşılmış ve sürtünme performansı düşmüştür. Bu, düşük yoğunluklu bilyalı dövmenin başlangıçta faydalı olsa da uzun süreli kayma uygulamaları için yeterli dayanıklılık sağlamayabileceğini göstermektedir. SP200 numunesi, tribolojik davranışta daha ileri düzeyde iyileşme göstermiş ve sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 9 metreye kadar düşük ve kararlı kalmış, SP100'e kıyasla daha sağlam bir kararlı durum rejimi ortaya koymuştur. Bu gelişme, daha etkin yüzey sertliği, daha derin kalıntı gerilme tabakası ve daha homojen çukurcuk dağılımının bir sonucu olarak değerlendirilmiştir. Bu numunede oluşan oksit film, daha dayanıklı olup daha uzun süre ara yüzey kararlılığını korumuş olabilir; ancak 9 metreden sonra sürtünme katsayısı değerinde yine kademeli bir artış gözlenmiş ve aşınma mekanizmalarının, özellikle oksit film bozulması ve yüzey altı

yorulmasının etkili olmaya başladığını göstermiştir. SP200 numunesi, sürtünme kararlılığı ve aşınma direncinde belirgin bir gelişme sunmada, uzun süreli kayma koşulları altında sınırlı bir tribolojik ömre sahip olduğunu ortaya koymuştur. SP500 numunesi, tüm gruplar arasında en avantajlı ve optimize edilmiş tribolojik profili sunmuş; çok kısa veya neredeyse yok denecek kadar az bir ilk çalışma evresinin ardından, sürtünme katsayısı değerinde yalnızca testin sonunda küçük bir artışla 12 metreye kadar uzanan uzun ve kararlı bir rejim sergilemiştir. Bu davranış, yüksek yüzey sertliği, derin ve iyi dağılmış basma gerilmeleri ile yük paylaşımı, gerilme dağılımı ve aşınma kalıntılarının tutulmasını kolaylaştıran homojen mikro çukurcuk topografyasının sinerjik etkilerine atfedilmiştir. Ayrıca, sertleşmiş yüzey altı tabakası mekanik desteği sürdürülebilir kılmış ve yüzey altı deformasyonu önleyerek tribolojik başarısızlığı geciktirmiştir. Al_2O_3 tabakasının bütünlüğü daha iyi korunmuş, muhtemelen kontrollü çatlama-yeniden oluşum döngülerinden geçerek ani sürtünme sıçramalarını önlemiştir. Genel olarak, SP500 numunesi, kuru kayma koşullarında üstün aşınma direnci, kararlı sürtünme davranışı ve uzun ömürlü ara yüzey bütünlüğü sağlayarak optimum bilyalı dövme koşulunu temsil etmektedir. SP1500 numunesi ise en düşük yüzey pürüzlülüğüne ve ortalama sürtünme katsayısı değerine (ortalama 0.19) sahip olmasına rağmen belirgin bir kararlı durum rejimi göstermemiş, test boyunca sürekli ancak sınırlandırılmış sürtünme katsayısı dalgalanmaları sergilemiş ve bu da dinamik tribolojik kararsızlığa işaret etmiştir. Bu davranış, aşırı bilyalı dövme uygulamasının neden olduğu yüzeyde aşırı sıkışma, gerilme lokalizasyonu ve yüzey altı mikro çatlakların oluşması gibi mekanik yanıt heterojenliklerinden kaynaklanabilir. Aşırı yoğun yüzey, çukurcuk ağının aşınma kalıntılarını yakalama veya gerilimi dağıtma etkinliğini azaltmış olabilir ve bu da üçüncü cisim parçacıklarının sürtünme dalgalanmalarına katkı sunmasına yol açmıştır. Ayrıca, aşırı deformasyona uğramış yüzeyin artan oksidatif reaktivitesi, oksit tabakasının sürekli oluşumu ve kırılmasıyla kararsızlığı daha da artırmış, düşük adhezyona rağmen uzun vadeli yapısal bütünlüğü olumsuz etkilemiştir. Bu durumda aşırı bilyalı dövme uygulamalarının zararlı etkilerini vurgulamaktadır.



Şekil 5.28. Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numunelerine ait sürtünme kat sayısının mesafeye karşı değişim grafiği.

Özetle, sürtünme katsayısı eğilimleri, bilyalı dövme işleminin yüzey ve yüzey altı özelliklerini değiştirerek tribolojik performansı etkili bir şekilde iyileştirdiğini, ancak bu iyileşmenin büyük ölçüde uygulanan kaplama oranına bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. İlk çalışma (run-in) periyodunun ardından, Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numuneleri için ortalama sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.67, 0.66, 0.62, 0.57 ve 0.19 olarak belirlenmiştir. Bilyalı dövme işleminden sonra ortalama sürtünme katsayısı değerleri kademeli olarak azalmış ve bu azalma, literatürde bildirilen bulgularla uyumlu şekilde yüzey sertleşmesi ve yüzeyde oluşan mikro çukurcukların yağlayıcı depolama işlevi görmesiyle açıklanmaktadır [17]. Orta düzeyde kaplama oranlarına sahip numuneler (SP200–SP500), mekanik dayanım ile yapısal kararlılık arasında denge sağlayarak düşük ve kararlı sürtünme değerleri sunmuştur. Buna karşılık hem SP100 hem de SP1500 yüzeylerinde ya yeterli sertleşmenin sağlanamaması ya da mikroyapısal kararsızlık nedeniyle sürtünme artışları veya dalgalanmaları meydana gelmiştir. Bu nedenle, SP500 numunesi, aşınma süreci boyunca artırılmış yüzey bütünlüğü ve tutarlı tribolojik yanıt sağlayan optimal bilyalı dövme koşulu olarak öne çıkmaktadır.

6. SONUÇLAR

Son yıllarda, özellikle ulaşım, havacılık ve yenilenebilir enerji sektörlerinde sürdürülebilir ve enerji verimli mühendislik malzemelerine olan talep önemli ölçüde artmıştır. 6061-T6 gibi alüminyum alaşımları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunmaları nedeniyle hafif yapısal uygulamalar için oldukça uygundur. Ancak, bu alaşımların nispeten düşük aşınma dirençleri, zorlu çevre koşullarında uzun vadeli performanslarını sınırlamaktadır. Bu bağlamda, bilyalı dövme işlemi, yüzeyde faydalı basma tipi kalıntı gerilmeler oluşturarak ve yüzeyi sertleştirerek aşınma ve yorulma direncini önemli ölçüde artıran mekanik bir yüzey işlemidir. Geleneksel kaplama yöntemleri veya kimyasal yoğun işlemlerden farklı olarak bilyalı dövme, nispeten düşük enerji tüketimi, zararlı kimyasallar içermemesi ve çelik bilya gibi geri dönüştürülebilir ortamların defalarca kullanılabilmesi gibi çevre dostu avantajlara sahiptir. Bilyalı dövme işlemi, alüminyum alaşımlarının yüzey dayanımını artırırken, alaşımın hafifliği veya geri dönüştürülebilirliği özelliğinden ödün vermediği için sürdürülebilir üretime doğrudan katkı sağlar; bu sayede, parça ömrü uzar, malzeme israfı azalır ve hammadde kullanımı daha verimli hâle gelir. 6061-T6 alüminyumun hafif yapısıyla, bilyalı dövme işlemiyle elde edilen aşınma direnci artışı birleştiğinde, yeşil teknolojilerin ve sürdürülebilir mühendislik çözümlerinin geliştirilmesine güçlü bir destek sunulmuş olur.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1) Kaplama oranı arttıkça, plastik deformasyona uğrayan yüzey tabakasının kalınlığı kademeli olarak artmıştır.
- 2) Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri, %100'den %500'e kadar artmış, ancak %1500 kaplama oranında düzleşme etkisi nedeniyle azalma göstermiştir.
- 3) Numune üst kenarlarında gözlemlenen malzeme akışı, kaplama oranı ile birlikte artmıştır.
- 4) En yüksek sertlik değeri SP1500 numunesinde elde edilmiş olsada, bu artış SP500 numunesine kıyasla anlamlı düzeyde olmamıştır; benzer durum artık gerilme profilleri için de gözlenmiştir.
- 5) Spesifik aşınma oranı sonuçlarına göre en yüksek aşınma direncine sahip numune SP1500'dür.
- 6) Kuru kayma koşullarında yapılan plaka üzeri bilya aşınma testleri sırasında, baskın aşınma mekanizmaları adhezif ve abrazif aşınma ile bu mekanizmaların kombinasyonları olmuştur.

- 7) Elde edilen sürtünme katsayısı değerleri, bilyalı dövme işleminin yüzey özelliklerini değiştirerek tribolojik performansı etkin şekilde artırdığını, ancak bu etkinin kaplama oranına yüksek derecede bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Sırasıyla Sref, SP100, SP200, SP500 ve SP1500 numuneleri için ortalama sürtünme katsayısı değerleri 0.67, 0.66, 0.62, 0.57 ve 0.19 olarak llmştur.



KAYNAKÇA

- [1] Al-Qutub, A., Al-Hamed, A. A. S. ve Mohammed, A. S. (2024). Elevated temperature tribological performance of submicron alumina particle-reinforced 6061 aluminium alloy under dry conditions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49 (2), 1597–1610.
- [2] Hanish Anand, S., Venkateswaran, N., Sathishkumar, B. ve Rajeshkumar, L. (2024). Microstructural, mechanical and tribological analysis of TiB₂ ceramic-reinforced Al6061 aluminum alloy composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49 (2), 1827–1842.
- [3] Niamat, M., Sarfraz, S., Shehab, E., Ismail, S. O. ve Khalid, Q. S. (2019). Experimental characterization of electrical discharge machining of aluminum 6061 T6 alloy using different dielectrics. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44 (9), 8043–8052.
- [4] Rajeshshyam, R., Venkatraman, R. ve Raghuraman, S. (2022). Process optimisation and tribological behaviour studies on surface modified Al 6061-T6 alloy deposited with WS₂ solid lubricant layer through electrical discharge approach. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47 (7), 8009–8030.
- [5] Reyaz, M. S. B., Sinha, A. N., Mehdi, H. ve Murtaza, Q. (2024). Effect of pulsed TIG welding parameters on the microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar AA6061-T6 and AA7075-T6 weldments. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49 (8), 10891–10911.
- [6] Oberreiter, M., Horvath, M., Stoschka, M. ve Fladischer, S. (2023). Effect of surface finishing state on fatigue strength of cast aluminium and steel alloys. *Materials*, 16 (13), 4755.
- [7] Žagar, S., Mrvar, P., Grum, J. ve Šturm, R. (2022). The influence of shot peening and artificially ageing aluminium alloy 7075 on corrosion behaviour. *Materials*, 15 (9), 3094.
- [8] Žagar, S., Markoli, B., Naglič, I. ve Šturm, R. (2021). The influence of age hardening and shot peening on the surface properties of 7075 aluminium alloy. *Materials*, 14 (9), 2220.
- [9] Tekkalmaz, M., Er, Ü., Çakır, F. H. ve Bozkurt, F. (2021). A new approach to monitoring the operational success of shot peening with electromechanical impedance technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117 (11–12), 3503–3513.
- [10] Çakır, F. H., Öteyaka, M. Ö., Er, Ü. ve Bozkurt, F. (2021). Enhancing wear resistance of AISI 304 alloy with shot peening and investigation of corrosion behaviour in marine water. *Transactions of the IMF*, 99 (4), 194–202.

- [11] Wang, T., Wang, J. B., Zhang, X. J. ve Liu, C. (2021). A study on prediction of process parameters of shot peen forming using artificial neural network optimized by genetic algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46 (8), 7349–7361.
- [12] Chen, B., Huang, B., Liu, H., Li, X., Ni, M. ve Lu, C. (2014). Surface nanocrystallization induced by shot peening and its effect on corrosion resistance of 6061 aluminum alloy. *Journal of Materials Research*, 29 (24), 3002–3010.
- [13] Mohammadi, S., Irani, M. ve Karimi Taheri, A. (2015). The effects of combination of severe plastic deformation and shot peening surface treatment on fatigue behavior of 6082 aluminum alloy. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 56 (2), 206–211.
- [14] Sun, Q., Han, Q., Wang, S. ve Xu, R. (2020). Microstructure, corrosion behaviour and thermal stability of AA 7150 after ultrasonic shot peening. *Surface and Coatings Technology*, 398, 126127.
- [15] Ravnikar, D., Šturm, R. ve Žagar, S. (2023). Effect of shot peening on the strength and corrosion properties of 6082-T651 aluminium alloy. *Materials*, 16 (14), 4976.
- [16] Toparlı, M. B. (2020). Effect of shot peening on ballistic limit of Al6061-T651 aluminium alloy plates. *Experimental Techniques*, 44 (1), 37–47.
- [17] Mathi, P., Prasad, C. R., Chembuly, V. V. M. J. S., Sai, A. N., Chekuri, R. B. R., Penmetsa, R. V. ve Gudar, K. R. (2025). Effect of shot peening-induced microstructure and precipitate evolutions on the surface residual stresses, hardness, and wear behavior of Al 6061 alloy. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. (Makale baskıda.)
- [18] Wang, Q., Ozaki, K., Ishikawa, H., Nakano, S. ve Ogiso, H. (2006). Indentation method to measure the residual stress induced by ion implantation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 242 (1–2), 88–92.
- [19] Ji, H., Hu, Y., Yu, R., Liu, S., Pei, W. ve Wang, B. (2023). Experimental study on TIG full welding and single pass welding quality of 6061-T6 aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 5965–5976.
- [20] Jiang, Y., Qiu, X., Song, Z., Dai, S., Chen, Z., Wang, X., Wu, C., Ren, X. ve Meng, C. (2024). New insights into enhancing the mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy MIG welded joints by constructing bionic heterostructure. *Materials Science and Engineering: A*, 912, 147009.
- [21] Bao, L., Li, K., Zheng, J., Zhang, Y., Zhan, K., Yang, Z., Zhao, B. ve Ji, V. (2022). Surface characteristics and stress corrosion behavior of AA 7075-T6 aluminum alloys after different shot peening processes. *Surface and Coatings Technology*, 440, 128481.

- [22] Su, C.-H., Chen, T.-C., Ding, Y.-S., Lu, G.-X. ve Tsay, L.-W. (2023). Effects of micro-shot peening on the fatigue strength of anodized 7075-T6 alloy. *Materials*, 16 (3), 1160.
- [23] Wang, Z., Xie, L., Zhang, Q., Ali, R. A., Chen, W. ve Zhou, L. (2023). Surface layer strengthening mechanism of 2060 aluminum–lithium alloy after shot-peening. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 4615–4633.
- [24] Si, C., Sun, W., Tian, Y. ve Cai, J. (2023). Cavitation erosion resistance enhancement of the surface modified 2024T351 Al alloy by ultrasonic shot peening. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129122.
- [25] John, M., Ralls, A. M., Misra, M. ve Menezes, P. L. (2023). Effect of ultrasonic impact peening on stress corrosion cracking resistance of austenitic stainless-steel welds for nuclear canister applications. *Journal of Nuclear Materials*, 584, 154590.
- [26] Er, Ü. ve Bozkurt, F. (2022). Investigation of the effects of cryogenic treatment on the friction and wear properties of 36CrB4 boron steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47 (12), 16209–16221.
- [27] Liu, X., Yang, M., Zhou, D. ve Zhao, Y. (2020). Microstructure and wear resistance of Mg₂Si–Al composites fabricated using semi-solid extrusion. *Metals*, 10 (5), 596.
- [28] Tebib, M., Samuel, A. M., Ajersch, F. ve Chen, X.-G. (2014). Effect of P and Sr additions on the microstructure of hypereutectic Al–15Si–14Mg–4Cu alloy. *Materials Characterization*, 89, 112–123.
- [29] Bozkurt, F. (2024). The effect of anodizing time on the tribological properties of 6061-T6 aluminum alloy. *METAL 2024 Conference Proceedings*, 373–379.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0004-4053-2228

Ad Soyad : Orçun CANBULAT

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2018, Stajyer, Esray Makine Otomotiv İnşaat San. Ve Tic. A.Ş
- 2021, Stajyer, ESTRAM – Eskişehir Hafif Raylı Sistem İşletmesi
- 2021, Karabük Üniversitesi, Raylı Sistemler Mühendisliği

