

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İNCONEL 718 ALAŞIMINDA BİLYALI DÖVMENİN MALZEME
ÖZELLİKLERİ VE EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ**

ALİ ÇULHA

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

INCONEL 718 ALAŞIMINDA BİLYALI DÖVMENİN MALZEME
ÖZELLİKLERİ VE EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ

Ali ÇULHA

Doç. Dr. Sinan FİDAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ekrem ALTUNCU
Jüri Üyesi, Sakarya Uyg. Bilimler Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 07.02.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gaz türbinli motorlarda yoğun bir şekilde süper alaşımlar kullanılmaktadır. Süper alaşımlardan inkonel 718 nikel alaşımı ise kompresör ve türbin kanatçıklarının imalinde kullanılmaktadır. Gaz türbinli motorların bu bölmeleri de katı partikül erozyonuna en çok maruz kalan bölgeleridir. Aşınma sıcaklığın ve korozyonun etkisi ile daha etkin olmaktadır. Aşınmayı azaltmak için değişik yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Ancak literatür taraması yapıldığında bu konuya kapsamlı bir çözüm getirilemediği gözlemlenmiştir. Bu kapsamda bilyeli dövme yaparak gaz türbinli motorların bu bölgelerindeki aşınmalara çözüm önerileri sunabilmek için inconel 718 nikel alaşımının bilyeli dövme ve erozif aşınma davranışları incelenmeye çalışılmıştır.

Yüksek Lisans Tez çalışmalarım boyunca zaman ve mekân gözetmeksizin her daim yanımda olarak katkı ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Sinan FİDAN'a, değerli fikirleri ve tecrübeleri ile çalışmalarımı yönlendiren hocam Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e saygılarımı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatın olanca zorluğuna rağmen bir fidan gibi büyümemi, ağaç olmamı sağlayan annem Cahide ÇULHA'ya, duruşu, hayata bakışı ile beni cesaretlendiren, bilginin bir deniz olduğunu, onu boğulmadan alınması gerektiğini hissettiren babam Kemal ÇULHA'ya, sevgisini her daim yanımda hissettiğim canım aşkım (eşim) Ayşe ÇULHA'ya, eğitimi için bana ihtiyacı olmasına rağmen bana zaman tanıyan canım oğlum Atakan ÇULHA'ya ve kendi oyun saatinden alarak bana veren sevgili oğlum Atalay ÇULHA'ya en içten sevgilerimi sunuyorum.

Yüksek Lisans Tez çalışmalarım boyunca beni anlayış ile karşılayan Deniz Hava Komutanlığı'ndaki mesai arkadaşlarıma, öğrencilerime ve komutanlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak-2019

Ali ÇULHA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
GİRİŞ	1
1. SÜPERALAŞIMLAR	3
1.1. Süper Alaşımın Sınıflandırılması	5
1.1.1. Demir esaslı süper alaşımlar	7
1.1.2. Kobalt esaslı süper alaşımlar	8
1.1.3. Nikel esaslı süper alaşımlar	9
1.1.3.1. Kati-eriyik nikel alaşımlar	10
1.1.3.2. Çökelme-dayanımlı nikel alaşımlar	10
2. MALZEME: INKONEL	11
2.1. Bileşim	12
2.2. Özellikler	12
2.3. İşleme	13
2.4. Birleştirme	13
2.5. Kullanım Alanları	13
2.6. Süper Alaşımın Uygulama Alanları	14
2.7. Inconel Alaşımları	16
3. MALZEME AŞINDIRICILAR	17
3.1. Aşındırıcı Partikül Özellikleri	17
3.1.1. Alümina mineralinin özellikleri	17
3.1.2. Alümina mineralinin kullanım alanları	18
3.1.3. Çelik bilye özellikleri	18
4. KATI PARTİKÜL EROZYONU	20
4.1. Aşınan Malzeme Özellikleri	21
4.2. Aşındırıcı Madde Özellikleri	22
4.3. Operasyon Parametreleri	23
4.3.1. Aşındırıcı partiküllerin hızı	23
4.3.2. Partikül çarpma açısı	24
4.3.3. Aşındırıcı partiküllerin boyutu	25
4.3.4. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debisi	26
4.3.5. Sıcaklık ve nem	26
4.3.6. Aşındırıcı partiküllerin özellikleri	27
4.3.7. Aşındırıcı partikül debisinin ölçülmesi	28
4.3.8. Aşındırıcı partikül çarpma hızlarının ölçülmesi	28
4.3.9. Aşınma deneylerinin yapılması	31
4.3.10. Profilometre ile yüzey analizinin yapılması	32
4.3.11. Erozyon oranı hesaplaması	33
4.3.12. Fiziksel ve kimyasal özellikleri SAE	33
4.3.13. Çelik bilye kullanım alanları	35
5. ZIMPARALAMA VE PARLATMA	36
6. BİLYA PÜSKÜRTME (SHOT PEENING)	40

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	43
7.1. Test Numunelerinin Hazırlanması	43
7.2. Birinci Aşama: Bilyeli Dövme Yöntemi İle Yüzey Sertleştirme İşlemi.....	45
7.3. İkinci. Aşama: Aşınma Deneylerinin Yapılması	47
7.4. Aşınma Testlerinin Sayısal Verileri	50
7.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri Sayısal Verileri	51
7.6. Yüzey Sertlik Ölçümlerinin Sayısal Verileri	54
8. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	59
8.1. Aşınma Deneylerinin Değerlendirilmesi	59
8.2. Yüzey Sertlik Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	65
8.3. Yüzey Pürüzlülük Değerlendirmesi (Profilometre Görüntüleri)	72
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR	88
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	90
ÖZGEÇMİŞ	91



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kesiti alınmış gaz türbinli motor.....	16
Şekil 3.1. Alümina minerali ve doğadaki görünümü.....	17
Şekil 4.1. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler.....	21
Şekil 4.2. Zaman-kütle kaybı grafiği.....	22
Şekil 4.3. Açık değişimi-kütle kaybı grafiği.....	24
Şekil 4.4. Alümina numunesi ve elektron mikroskobu görüntüsü.....	27
Şekil 4.6. 1.5 bar (solda),3 bar (sağda) açık ölçüm diskleri.....	30
Şekil 4.7. Katı partikül erozyonu test düzeneği.....	31
Şekil 4.8. Nanovea PS50 optik profilometre cihazı.....	32
Şekil 4.9. Çelik bilye görüntüleri.....	34
Şekil 6.1. Türbin kanatçıklarının bilye püskürtme ile yüzey işleme.....	40
Şekil 6.2. Gaz türbinli motor kompresör kısmının bilyeli püskürtme işlemi.....	41
Şekil 6.3. Bilyeli dövme yöntemi.....	42
Şekil 7.1. Deney akış şeması.....	43
Şekil 7.3. Test standına numunelerin tutturulması.....	45
Şekil 7.4. Bilyeli dövmede kullanılan çelik bilyelerin 3D topografyası.....	46
Şekil 7.5. Nanovea PS50 temassız 3D optik profilometre seti.....	46
Şekil 7.6. Deney esnasındaki güvenlik önlemleri.....	48
Şekil 7.7. Yüzey sertlik ölçümü iz oluşturma cihazı.....	49
Şekil 8.1. Yüzey sertleştirme yapılmadan aşındırma.....	59
Şekil 8.2. Bilye püskürtme yapılan ve yapılmayan kıyaslanması.....	60
Şekil 8.4. 80 mesh çelik bilye 3 bar süre aşınma grafiği.....	61
Şekil 8.5. Karışık çelik bilye 1,5 bar süre aşınma grafiği.....	62
Şekil 8.6. Karışık çelik bilye 1,5 bar süre aşınma grafiği.....	63
Şekil 8.7. 80 mesh ve karışık çelik bilye, 1,5 bar ve 3 bar aşınma grafiği.....	63
Şekil 8.9. Sade bilye 1,5 bar yüzey bilye püskürtme yüzey sertlik grafiği.....	65
Şekil 8.10. Sade bilye 1,5 bar bilye püskürtme, aşınma yüzey sertlik grafiği.....	66
Şekil 8.12. Sade bilye 3 bar bilye püskürtme, aşınma yüzey sertlik grafiği.....	67
Şekil 8.13. Karışık bilye 1,5 bar bilye püskürtme sonrası yüzey sertlik grafiği.....	68
Şekil 8.14. Karışık bilye 1,5 bar aşınma sonrası yüzey sertlik grafiği.....	69
Şekil 8.15. Karışık bilye 3 bar yüzey sertleştirme yüzey sertlik grafiği.....	69
Şekil 8.16. Karışık bilye 3 bar yüzey sertleştirme, aşındırma yüzey sertliği.....	70
Şekil 8.17. Tüm sertlik değerlerinin kıyaslanması.....	70
Şekil 8.18. Bilye püskürtme sonrası yüzey sertlik değerleri.....	71
Şekil 8.19. Aşındırma sonrası yüzey sertlik değerleri.....	72
Şekil 8.20. Karışık bilye 1,5 bar yüzey sertleştirme ve aşınma analizleri.....	73
Şekil 8.21. Karışık bilye 3 bar yüzey sertleştirme ve aşınma analizleri.....	74
Şekil 8.22. Sade bilye 1,5 bar yüzey sertleştirme ve aşınma analizleri.....	76
Şekil 8.23. Sade bilye 3 bar yüzey sertleştirme ve aşınma analizleri.....	77
Şekil 8.24. Yüzey pürüzlülük verilerinin gruplandırılması.....	78
Şekil 8.25. Sade bilye 1,5 bar yüzey pürüzlülük.....	79
Şekil 8.26. Sade bilye 1,5 bar bilye püskürtme S pürüzlülük değerleri 3D.....	79
Şekil 8.27. Sade bilye 1,5 bar bilye püskürtme S pürüzlülük değerleri.....	80
Şekil 8.28. Sade bilye 1,5 bar bilye püskürtme R pürüzlülük değerleri.....	80
Şekil 8.29. Sade bilye 3 bar bilye püskürtme yüzey pürüzlülüğü.....	81
Şekil 8.30. Aşınma öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü [24].....	81
Şekil 8.31. Erozyon krateri orta noktası R_a değerleri.....	82

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. İnkoneller ve bileşimleri	11
Tablo 2.1. İnconel Elementleri.....	12
Tablo 4.1. Malzeme erozyon davranışları	22
Tablo 4.2. Alümina aşındırıcının fiziksel özellikleri	27
Tablo 4.3. Debi ölçümleri	28
Tablo 5.1. Zımparaların gösterimi	37
Tablo 7.1. İşlem Yapılan Numunelerin Kodlanması.....	44
Tablo 7.2. Aşınma testi sayısal verileri.....	50
Tablo 7.3. Yüzey pürüzlülük ölçümleri sayısal verileri	52
Tablo 7.4. Yüzey sertlik ölçümleri sayısal verileri	55



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
E	: Erozyon oranı
L	: Diskler arası mesafe, (m)
m _e	: Aşındırıcı partikül kütlesi, (gr)
N	: Mil devir hızı, (rpm)
T	: Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresi, (s)
V	: Partikül çarpma hızı, (m.s ⁻¹)
θ	: İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı, (°)
Δm _s	: Numune kütle kaybı, (gr)



INCONEL 718 ALAŞIMINDA BİLYALI DÖVMENİN MALZEME ÖZELLİKLERİ VE EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ

ÖZET

Inconel 718 nikel süper alaşımları havacılık ve uzay sanayinde sahip oldukları özelliklerden ötürü yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Inconel 718 malzemesinden imal edilmiş kompresör ve türbin kanatçıkları servis şartları altında çalışırken katı partiküllerin motorun içine hava ile çekilmesi sebebiyle kanatçıklarda erosiv aşınma hasarına sebep olmaktadır. Bu nedenle, Inconel 718'in aşınma direncini arttırmak için, bilyalı dövme (shot peening) yaygın olarak kullanılan önemli bir işlemdir. Bilyalı dövme işlemiyle malzeme yüzeyinde yüzey sertliğinde artış sağlanırken aynı zamanda eroziv aşınma dayanımına katkısını araştırmak bu tezin temel hedeflerinden biri olacaktır. Tez kapsamında Inconel 718'e önce bilyeli dövme işlemi uygulanarak yüzey sertliğinde artış sağlanmıştır. Bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme işleminden sonra yüzey pürüzlülük değerlerine bakılmış aynı zamanda yüzey sertlik ölçümleri de yapılmıştır. Daha sonraki aşamada ise bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapılan numunelere katı partikül erozyon testi uygulanmıştır. Bilyeli dövme yönteminde, basınç ve çelik bilyelerin boyutu işlemin başarısı için önem arz ettiğinden dolayı, iki farklı basınç ve iki farklı bilye boyutu ile beş farklı zamanda uygulanmıştır. Bilyeli dövme yöntemi ile 1,5 bar ve 3 bar basınçla 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika, 5 dakika, 10 dakika süre ile yüzey sertleştirilmesine tabi tutulan Inconel 718; alümina partiküller ile aşındırılmıştır. Tüm bu parametrelerin Inconel 718 alaşımının eroziv aşınma davranışına etkisi hesaplanan erozyon oranları ile elde edilen grafikler yardımıyla yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar katı partikül erozyonuna maruz kalan uygulamalarda eroziv aşınma hasarının en aza indirilmesi için doğru tasarımların gerçekleştirilmesi noktasında büyük önem arz edecektir ve ilerisi için mühendislere fikir verecektir. Bu yüksek lisans tezinin amacı; farklı servis şartları altında çalışan Inconel 718 malzemesinden imal edilmiş parçalarda uygulanacak bilyalı dövme işleminin ve sonrasında gerçekleştirilen eroziv aşınma testlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerini ortaya koymaktır. Ayrıca, bilyalı dövme işleminin erosiv aşınma dayanımına etkisi olup olmadığı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilyalı Dövme, Inconel 718, Katı Partikül Erozyonu, Pürüzlülük, Yüzey Sertliği.

EFFECTS OF SHOT PEENING ON INCONEL 718 ALLOY AND ITS EROSIWE WEAR BEHAVIOUR

ABSTRACT

Inconel 718 nickel super alloys are widely used in aviation and aerospace industries. Compressors and turbine blades made of Inconel 718 material work under service conditions and cause erosive wear damage in the blades as solid particles are drawn into the engine by air. For this reason, in order to increase the wear resistance of the Inconel 718, shot peening is an important process that is widely used. This thesis aims to increase the surface hardness of the material surface utilizing shot peening process and at the same time to investigate its contribution to erosive wear resistance. Within the scope of the thesis, Inconel 718 was first applied to the shot peening process to increase the surface hardness. After the surface hardening process, surface roughness values were examined by using the shot peening and surface hardness measurements were also made. In the later stage, solid particle erosion test was applied to the specimens which were shot peened. Since the size of the pressure and steel balls are essential for the success of the process in the shot peening method, it has been applied in five different times with two different pressure and two different ball sizes. Inconel 718, which has been subjected to surface hardening for 1 minute, 2 minutes, 3 minutes, 5 minutes, 10 minutes with 1.5 bar and 3 bar pressure by shot peening method; eroded with alumina particles. The effect of all these parameters on the erosive wear behavior of the Inconel 718 alloy was interpreted with the help of the graphs obtained by the calculated erosion rates. The results obtained will be of great importance for correct designs to minimize erosive wear damage in applications exposed to solid particulate erosion and will give an idea to engineers for the future. The aim of this master thesis is; Inconel 718 material is working under different service conditions to be applied to parts of the shot peening process and subsequent erosive wear tests to determine the effects of surface roughness. Besides, it has been investigated whether the impact of erosive wear resistance of the shot peening.

Keywords: Shot Peening, Inconel 718, Solid Particle Erosion, Roughness, Surface Hardness.

GİRİŞ

Günümüz teknolojik gelişmesi ve toplumsal ilerlemenin sonucunda hayatımızda birçok kolaylıklar oluşmuştur. Oluşan teknolojik gelişmeler kendi sorunları ile ilerlemektedir. Sorunlar çözüldükçe ilerleme hızlanmaktadır. Havacılık hayatımızın odak noktasına oturmuştur. Bu nedenle havacılıkta kullanılan malzemelerin sürekli geliştirilmesi ve yeni problemlerin çözülmesi gerekmektedir. Gaz türbinli motorlarda daha verimli çalışması için daha yüksek sıcaklarda çalışmaktadır. Ayrıca hava şartlarına ve kirli havaya bağlı olarak motorlarda yüksek oranda erozif aşınma meydana gelmektedir. Bu erozif aşınmayı azaltmak için süper alaşımlar geliştirilmiştir ancak onlar da yeterli olmamıştır. Bu soruna çözüm olması ve farklı bir yaklaşım getirebilmek için bu tez çalışması yapılmıştır.

Süper alaşımlar 540°C ile 1000°C arasında yüksek çalışma sıcaklıklarında dayanıklılık kaybı olmadan çalışabilirler. Nikel esaslı bir süper alaşım olan Inconel 718 havacılık sektöründe özellikle gaz türbinli motorlarda yaygın olarak kullanılır.

Hava araçları sert partiküllerin hava ile sürüklenerek motor üzerine taşındığı ortamlarda çalıştığı zaman, bileşenler aşınmaya maruz kalır ve katı partikül erozyonu ile malzeme koparılır. Bu tür bir hasarlar gaz türbinli motorlardaki en önemli hasardır. Bu hasar ile kompresör bıçakları aşınır ve aerodinamik performans ile yapısal bütünlük tehlikeye girer. Sonuç olarak endüstride ve akademide katı partikül erozyonu ile oluşan malzeme kaybı mekanizmasını anlamak ve bileşen ömrünü uzatacak koruyucu yaklaşımlar geliştirmek için birçok çalışma yapılmıştır.

Bu noktada son yıllarda özellikle havacılıkta kullanılan süper alaşımların erozif aşınma davranışına yönelik çalışmalar üzerine odaklanılmıştır. Ayrıca erozif aşınma, süper alaşımlara istenilen yüzey özelliklerinin kazandırılması için, etkilerini bilerek kullanmak istediğimiz bir yöntemdir. Bu durumda süper alaşımların erozif aşınma davranışlarının tam olarak anlaşılması hem erozyon sebebiyle oluşacak hasarın en aza indirgenmesi ve hasar oluşmadan önlem alınması, hem de malzemeye istenilen yüzey özelliklerinin kazandırılması için oldukça önemlidir.

Tez kapsamında Inconel 718 süper alaşımı önce bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulmuştur. Bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme işleminden sonra yüzey pürüzlülük değerlerine bakıldı aynı zamanda yüzey sertlik ölçümleri de yapılmıştır. Daha sonraki aşamada ise bilyeli dövme yöntemi ile yüzey serleştirmesi yapılan numuneler katı partikül aşınma testine tabi tutulmuştur. Bilyeli dövme yönteminde basınç parametresi ve çelik bilyelerin boyutu işlemin başarısı için önem arz ettiğinden dolayı iki farklı basınç ve iki farklı bilye boyutu ile beş farklı zamanda uygulanmıştır. Bilyeli dövme yöntemi ile 1,5 bar ve 3 bar basınçla 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika, 5 dakika, 10 dakika süre yüzey ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan Inconel 718 alümina partiküller ile aşındırılmıştır. Tüm bu parametrelerin Inconel 718 alaşımının erozif aşınma davranışına etkisi hesaplanan erozyon oranları ile elde edilen grafikler yardımıyla yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar katı partikül erozyonuna maruz kalan uygulamalarda erozif aşınma hasarının en aza indirilmesi için doğru tasarımların gerçekleştirilmesi noktasında büyük önem arz edecektir ve ilerisi için mühendislere fikir verecektir. Ek olarak numunelerin her iki deney sonrası ortalama aritmetik pürüzlülük değerleri hesaplanarak deney parametrelerinin numune yüzey topoğrafyasına etkisi incelenmiştir.

1. SÜPERALAŞIMLAR

Yüksek sıcaklıklarda çalışan alaşımların, çalıştığı ortamın yıpratıcı etkilerine karşı dayanıklı olması, imal şartlarına bağlı olarak yeterli mukavemete bünyesinde bulundurması ve ilave olarak yanı sıra yüksek sıcaklıklarda metalurjik veya yapısal değişimlere karşı koyabilmek için kararlı olması gereklidir.

Oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık korozyonu açısından en önemli alaşım elementi kromdur. Bu yüzden korozyon dirençli çelikler, paslanmaz çelikler, Ni-Cr alaşımları ve süper alaşım gibi malzemeler yeterli miktarda krom elementi içerir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında da yüksek bir oranda krom elementi kullanılmaktadır [1].

Yüksek sıcaklığa uzun süre dayanabilen ve bu nedenle pek çok endüstriyel kullanım alanları olan materyallerdir. Bunun en basit örneği, ateş tuğlalarıdır. Bu tuğlalardan örülmüş refrakter fırınlar, sanayide pek çok farklı amaçlarla kullanılmaktadır [2]. Gaz türbinli motorlarda da yanma odalarında refrakter olarak seramiklere olduğu kadar V-A grubu (vanadyum, niyobyum, tantalyum) ve VI-A grubu (krom, molibden, tungsten) metallere de ihtiyaç duyulmaktadır. Refrakter malzemesi olarak kullanılan metallerin oksidasyon direnci yeterli değildir. Bu nedenle bu malzemeler genellikle oksidasyona uğramayan alanlarda kullanılmaktadır. Seramik malzemeler ise, birçok yapısal uygulama için yeterli tokluğa sahip değildir [3]. Uygulamalarda yetersiz kalan malzeme teknolojisi ve mevcut teknolojideki sınırlamalar, süper alaşım malzemelerinin kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir [4].

Yüksek sıcaklıklarda kullanılmak için geliştirilenler ise genellikle VIII-A grubu elementlerden geliştirilen alaşım türleridir. Yüksek sıcaklıklarda kullanılacak malzemelerde, yüzey kararlılığı ve nispeten yüksek mekanik gerilim özellikleri istenilmektedir [3]. Süper alaşım, yüksek sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi gereken uçak türbin motorları ve süper turbo yükleyicilerin üretiminde kullanılmak için geliştirilen alaşımlardır [1]. Bu alaşımlar genellikle demir, nikel, kobalt ve krom'un farklı kombinasyonlarda bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Ayrıca düşük miktarda

tungsten, molibden, tantalyum, ni-yobyum, titanyum ve alüminyum da kullanılmaktadır. Süper alaşımların en önemli özellikleri,

1. 650 °C nin üzerindeki sıcaklıklarda mukavemetlerini korumaları,
2. Isı korozyonu ve erozyon dirençlerinin yüksek olmasıdır.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan süper alaşımlar; demir, krom ve nikel ihtiva eden süper alaşımlar, kompleks demir-nikel-krom kobalt kompozisyonları, karbürlerle güçlendirilmiş kobalt esaslı alaşımlar, katı çözelti olarak güçlendirilmiş nikel esaslı alaşımlar ve çökeltme-dağılma sertleştirilmesi uygulanmış nikel esaslı alaşımlardır.

Genellikle demir esaslı alaşımların, karmaşık demir-nikel-krom-kobalt alaşımların ve nikel esaslı katı çözelti olarak güçlendirilmiş alaşımların dirençleri 650 °C üzerindeki sıcaklıklarda, kobalt esaslı ve nikel esaslı (ikinci fazla güçlendirilmiş) alaşımların mukavemetlerinden daha düşüktür. Ergime noktalarına bağlı olarak, kobalt esaslı alaşımların 1100 °C üzerindeki sıcaklıklardaki mukavemeti, nikelli alaşımlara oranla daha yüksektir. Kobalt esaslı döküm alaşımlar, yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahiptir ve matrisleri içersinde karmaşık karbürler oluşur [5]. Bu malzemeler gaz türbini motorlarındaki hava üfleyicileri için kullanılmaktadır [3].

Süper alaşımların Tarihsel Gelişim Süreci Yüksek sıcaklıklarda yüksek performans gerektiren uçak türbin motorlarında kullanılan alaşımlar olarak tanımlanabilen süper alaşımlar ilk olarak İkinci 20. yüzyılın ilk yarısının sonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra ise süper alaşımların kullanım alanları genişleyerek havacılık, gaz türbinleri, roket motorları, kimyasal ve petrol tesisleri gibi geniş bir yelpazeye yayılmıştır. Süper alaşımlar çalışma koşullarında 6500C üzeri sıcaklıklara uzun süre dayanım göstermeleri sebebiyle bahsedilen kullanım alanları için oldukça uygundur. Süper alaşımlar zamanla türbin bıçaklarında yorulma performansı açısından ciddi oranlarda gelişme kaydedilmiştir [6]. Nimonic alaşımların geliştirilerek bıçak performanslarını arttırmasıyla başlayan gelişmeler, 1950'lerde vakum indüksiyon döküm teknolojilerinin geliştirilmesiyle kalite ve alaşım temizliği açısından sağlanan avantajlarla devam etmiştir. Daha sonra ise döküm metotlarının gelişmesiyle başlayan direk katılma prosesi, çapraz tane sınırlarını oluşturan kolonsal mikroyapıların elde edilmesini sağlayan gelişmeleri beraberinde getirmiştir. Bu gelişimin meydana gelmesiyle, tek kristalli olarak adlandırılan mono kristal süper alaşımlar tane sınırlarının kaldırılmasıyla elde 137 Mpa değerinde 1000 saat sürünme sıcaklık temin edilmiştir. Tane sınırlarının kaldırılması döküm nedeniyle oluşan mikrosegregasyonu azaltan bir ısı işlem uygulamasını mümkün kılan borür karbür

gibi mukavemeti artırıcı alaşım elementleri yapıya eklenmiştir. Böylece ısı işlem sırasında ergime başlamasından kaçınılmış ve yorulma ömrü arttırılmıştır [7]. Bugünlerde birçok alanda döküm kolonsal ve eş eksenli süper alaşımlar pratik olarak tanımlı olsa da tek kristalli süper alaşımlar yüksek sürünme dayanımı özellikleri gerektiren gaz türbin motorlarından her geçen gün artan bir kullanıma sahiptir. Aşağıdaki şekilde de görülebileceği gibi süper alaşımların sürünme kopması tek kristallerin geliştirilmesiyle artış göstermiştir. Örneğin SRR99 gibi ilk jenerasyon süper alaşımın sürünme kopması 8500C/500MPa için 250 saat iken, üçüncü jenerasyon RR3000 için bu değer 2500 saat olarak görülmektedir. Daha fazla arzulanan koşullarda kopma ömrü dört kat artış göstererek 250 saatten 1000 saat değerine ulaşır. Bu gelişmeler 1980'den 1995'e kadar olan 15 yıllık sürede gerçekleşmiş. PWA1480, Rene N4 ve SRR99 gibi ilk jenerasyon tek kristal süper alaşımlar belirli miktarlar Al, Ti ve Ta gibi γ' sertleştirme elementleri ile C ve B gibi tane sınırı sertleştirme elementleri içerirler. Direk katılmış alaşımlara rutin olarak eklenen bu elementler artık alaşımlarda mevcut değildir. PWA 1484 ve CMSX-4 ile Rene N5 gibi ikinci jenerasyon alaşımlar ise ağırlıkça %3 oranında Re içerirler. Bu oran daha sonra CMSx-10 ve Rene N6 gibi üçüncü jenerasyon alaşımlarda altıya çıkarılmıştır. Genel konuşacak olursak, modern alaşımlar oldukça düşük konsantrasyonlarda krom ve yüksek konsantrasyonlarda alüminyum ile Re içeren bir karakteristik sergilerler. Titanyum ve molibden oranları ise oldukça az 7 miktardadır. 2000'li yıllardan sonra oluşum gösteren MC-NG, EPM-102 ve TMS-162 gibi dördüncü nesil tek kristal süper alaşımlar ruthenium ilavesine sahiptirler [7]

1.1. Süper Alaşımların Sınıflandırılması

Nikel esaslı çökelme-sertleşmeli süper alaşımlar, önemli bir süper alaşım grubudur. Yüksek sıcaklıklarda, oksijen-yayımlı güçlenen alaşımlar ve hatta bazı kobalt alaşımları, nikel esaslı alaşımlar kadar dayanıklıdır. Süper alaşımlar içerisinde demir esaslı olanlar ve katı eriyik ile güçlendirilen alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda, mukavemeti en düşük olanlarıdır. Bu yüzden, nikel esaslı INCO 718 alaşımı dışında, demir esaslı süper alaşımlar uygulamalarda az kullanılmaktadır. INCO 718, geniş bir kullanım alanına sahiptir [8]. Katı-eriyik alaşımları, yüksek dayanımın istenmediği alanlarda kullanılmaktadır.

Kobalt esaslı süper alaşımların kullanımı, kartel işlevi gören metallere dolaylı büyük bir oranda azalmıştır. MAR-M509 gibi kobalt alaşımları geniş çapta uçak türbin

kanatçıkları dökümünde kullanılır ve Haynes 188 kobalt alaşımı ise uçak motorlarında kullanılan tutuşma malzemesidir [3].

Süper alaşımlar genel olarak üç ana gruba ayrılır:

a) Demir Esaslı Süper alaşımlar

- INCOLOY (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909)
- A-286
- ALLOY 901
- DISCALOY
- HAYNES 536
- H-155
- V-57

b) Kobalt Esaslı Süper alaşımlar

- HAYNES 188
- L-605
- MAR-M918
- MP35N
- MP159
- STELLITE 6B
- ELGILOY

c) Nikel Esaslı süper alaşımlar

- INCONEL (587, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, X750)
- NIMONIC (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.11, PE.16, Pk.33)
- Rene (41, 45)
- UDIMET (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720)
- PYROMET 860
- ASTROLOY
- M – 252
- HASTELLOY (C-22, G-30, S, X)
- WASPALOY
- UNITEMP AF2-IDA6
- CABOT 214
- HAYNES 230'dur [9].

1.1.1. Demir esaslı süper alaşımlar

Demir esaslı alaşımlar, ana element olarak demir ihtiva edip, ilaveten önemli miktarda krom, nikel ve çok az miktarda da molibden veya tungsten içermektedir. Bu grup karbür, intermetalik çökeltme ve/veya katı-eriyik tarafından güçlendirilir. İntermetalik çökelti genellikle $Ni_3(Al,Ti)$ γ' tipindedir. Bu grubun nikel-krom oranları ve güçlendirme mekanizmaları, paslanmaz çeliklerden farklıdır. Paslanmaz çelikler %12-25 Cr ve %0-20Ni içermekte, demir esaslı süper alaşımlar ise %20 den daha fazla Ni içermektedir (%25-35).

Yüksek miktarda demir içeren birçok süper alaşım olmasına rağmen, bunların hepsi demir esaslı süper alaşım değildir. Çünkü bu süper alaşımlar demir, nikel, krom, kobalt, az miktarda molibden, tungsten ve niobiyum gibi elementlerin karmaşık birleşimleridir. Bu duruma örnek olarak; katı-eriyik dayanımlı %16Fe ve %49Ni içeren Hastelloy X ile γ' - güçlenen %18,5Fe ve %52,5Ni içeren INCO 718 alaşımları verilebilir. Bu alaşımlar, Fe ihtiva eden nikel esaslı süper alaşımlardır. γ' -güçlenen INCO 901 süper alaşımı %42,5Ni ve %36Fe içeren nikel esaslı veya karmaşık demir-nikel-krom esaslı bir süper alaşımdır. Bu alaşım yüksek dayanımına ek olarak, sürekli düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. Kompleks bileşimli katı-eriyik dayanımlı alaşıma örnek olarak Multimet (N-155) alaşımı da verilebilir. Bu alaşım %21Cr, %20Ni, %20Co, %32,5Fe, %3Mo, %2,5W ve %1Nb içermektedir.

Süper alaşımların özelliklerini geliştirmek için, alaşımlara değişik elementler eklenmektedir. KYM'li matrisli alaşımlar için en etkili mukavemetlendirme nikel, alüminyum, tantalyum ve niobiyumla yapılır. Molibden ve tungsten gibi bazı elementler güçlendirme aşamalarında katı-eriyik içine eklenir [10].

KYM alaşımlar, karbon ilavesiyle sertleştirilmektedir. Nitrojen ve fosfor eklenerek bu sertleştirme tesiri artırılabilir. Karbon, aynı zamanda tane sınırlarında tane sınırı karbürü oluşturarak, dayanımı artırmaktadır. Karbür çökeltmesi için, karbür oranı yaklaşık %0,5 olmalıdır.

Oksidasyon direnci genel olarak krom elementiyle sağlanır. Bununla birlikte nikel ve mangan da oksidasyon direncini artırır. Küçük bir miktarda bor ilavesiyle yüksek sıcaklık özellikleri de artırılır. Demir esaslı alaşımların 504 °C üzeri sıcaklık uygulamaları için en önemli özellikleri KYM olmalarıdır. Çünkü bir kapalı paketli kafes, daha dirençlidir. İntermetalik bileşik çökelti tarafından mukavemetlenen demir esaslı

süper alaşımların ilk kullanım alanları, gaz türbin motorlarında bıçaklar, diskler ve bağlayıcılarıdır. A-28 alaşımı; bazı gaz türbin motorları, türbin diskleri ve jantları için kullanılır. A-286 aynı zamanda türbin kutuları için de kullanılmaktadır.

1.1.2. Kobalt esaslı süper alaşımlar

Kobalt esaslı süper alaşımlar, ana element olarak kobalt içerir. Ayrıca önemli miktarda nikel, krom, tungsten az miktarda molibden, niobiyum, tantal, titanyum ve bazen demir gibi elementler de içermektedir.

Kobalt esaslı süper alaşımlar, katı-eriyik ve karbür fazları tarafından güçlendirilir.

Kobalt katı-eriyik alaşımları üç gruba ayrılır:

- a) 650 °C den 1150 °C kadar sıcaklıklarda kullanılan Haynes 188, UMCo-50 ve S-816 alaşımları,
- b) Yaklaşık 650 °C'de kullanılan bağlayıcı (fastener) alaşımlar MP-35N ve MP-159,
- c) Aşınma dirençli Stellite 6B.

Kobalt esaslı süper alaşımların hiçbiri tam katı-eriyik alaşımı değildir. Çünkü hepsi ikincil karbür fazları veya intermetalik bileşikler içerir. Bu durum yaşlanmaya ayrıca da sıcaklığında süneklik kaybına da neden olur

Genellikle bütün kobalt esaslı süper alaşımlar ısıtma işlem ve yumuşatma sırasında KYM kristal yapıya sahiptir. Ancak MP-35N ve MP-159 alaşımlarında, kullanım öncesi, önerilen termomekanik işlem süresince kapalı-paket hegzagonal yapının miktarı kontrollü şekilde artırılır. 650 °C ve 1050 °C arasında ısıtma işlem uygulanan Stellite 6B ve 650 °C civarında ısıtma işlemi tabii tutulan Haynes 25 alaşımları, kısmen kapalı-paket hegzagonal (cph) yapıya dönüşebilir.

Haynes 25 yaygın olarak kullanılan kobalt esaslı bir süper alaşımdır. Bu alaşım gaz türbinlerinin yüksek sıcaklığa maruz kalan kısımlarında, nükleer reaktör parçalarında, cerrahi implantlarda ve soğuk çalışma şartlarında kullanılmaktadır.

Haynes 188 birçok mükemmel bir özelliğe sahip olup tutuşturucularda, geçiş kanalları ve gaz türbinlerinin iç tasarımında kullanılır. Bileşimlerinde lantan, silikon, alüminyum ve magnezyum vardır. Bu alaşımın, 1100 °C de oksidasyon direnci ve sürünme direnci yüksektir. Oda sıcaklığında şekillendirilebilmekte ve uzun süreli yaşlanmadan sonra çalışma sıcaklığında sünekliğini korumaktadır. %21 Fe içeren UMCo-50

alaşımı, Haynes 25 veya Haynes 188 kadar sert değildir. UMCo-50 fırın parçaları ve karıştırıcılar için kullanılmaktadır.

MP-35N ve MP-159 alaşımları, işlem sertleşebilirliği istenilen yerlerde kullanılır. Her iki alaşım da yüksek dayanım ve süneklığe sahiptir. Bu alaşımlardaki yüksek dayanım ve süneklilik birleşiminin nedeni, işleme sonucu sertleşen KYM matriste kapalı-paket hegzagonal yapının small platalet dönüşümüdür.

Kobalt katı-eriyik alaşımlarının son grubu Stellite 6B dir. Bu alaşım yüksek sıcaklık sertliği ve oksidasyon direncine sahiptir. Bu özelliği ise yük-sek krom içeriğinden (yaklaşık %30) kaynaklanmaktadır. Stellite 6B, genellikle buhar türbinlerinde kullanılmaktadır.

Karbür-faz dayanımlı kobalt esaslı süper alaşımlar X-40, WI-52, MAR-M302 ve MAR-M509 yaygın olarak uçak yakıt motor türbinlerinde ve statik kanat uygulamalarında kullanılır. Bu alaşım-lar, yüksek-sıcaklık dayanımına ve oksidasyon di-rencine ayrıca kaynak ile onarılabilme özelliğine sahiptir [3].

1.1.3. Nikel esaslı süper alaşımlar

Nikel esaslı süperalaşımlar ana element olarak %30 ile 70Ni ve önemli miktarda, %30 ile üstü Cr, içermektedir. Demir elementi Inconeller, Ni-monicler ve Hastelloy gibi nikel esaslı süper alaşımlar içinde az miktarda, Incoloy 901 ve Inconel 706 gibi alaşımlarda ise yaklaşık %35 oranında bulunur. Bazı nikel esaslı alaşımlar, dayanım direnci ve korozyon direnci için az miktarda alüminyum, titanyum, niobiyum, molibden ve tungsten de ihtiva etmektedir

Nikel esaslı süper alaşımlar katı-eriyik ve ikincil-faz intermetalik çökelti tarafından mukavemetlendirilmektedir. İntermetalik şekillendirici olarak kullanılan elemanlar alüminyum, titanyum ve niobiyumdur.

Ni esaslı süper alaşımlardaki nikel ve krom birleşimi bu alaşımların oksidasyon direncini artırır. Nikel esaslı süper alaşımlar, özellikle 650 °C üstü sıcaklıklarda, mekanik dayanım açısından paslanmaz çeliklerden daha üstündür.

Inconel 600, Inconel 601 ve RA 333 gibi katı-eriyik alaşımları, yaygın olarak ısı işlemler ekipmanları ve fırın parçalarında kullanılmaktadır. Bunun nedeni bu alanlarda yüksek

oksidasyon-korozyon direnci ve yüksek dayanıma sahip malzemelere ihtiyaç duyulmasıdır.

Ni esaslı süper alaşımların diğer bir kullanım alanı da enerji jeneratörleridir. Nükleer enerji fabrikalarında (buhar üretici tüpler ve reaktör karotların yapısal bileşenleri) ayrıca fosil-yakıt fabrikalarında (ısıtıcı tüpler, kül-alıcı sistemler ve ısı-korozyon ihtiyacı duyulan parçalar) da yaygın olarak kullanılırlar.

1.1.3.1. Kati-eriyik nikel alaşımlar

Kati-eriyik nikel alaşımlar, tavlama sıcaklığında ve tavlama temperlenmesinde kullanılır. 870-980 °C'lik düşük tavlama sıcaklığı, en yüksek süneklik ve yorulma dayanımı sağlar. 1120-1200 °C'lik bir yüksek sıcaklık tavlaması ise optimum yorulma direnci ve 600 °C'den büyük çalışma sıcaklığında ise sürünme-kopma özelliklerini sağlar. Hastelloy X, Inconel 601, Inconel 625 önemli bazı kati-eriyik nikel alaşımlarıdır. Bu alaşımlar genellikle uzay uygulamalarında kullanılır.

1.1.3.2. Çökelme-dayanımlı nikel alaşımlar

Çökelme-dayanımlı nikel alaşımlar, ikinci bir fazın çökmesi ile elde edilir. Çökelen faz, (genellikle γ' veya γ'') alaşımın sertliğini ve dayanımını önemli derecede artırır. Bu alaşımların çoğunda, γ' intermetalik $Ni_3(Al,Ti)$ fazın şekillenerek çökelti-sertleşmesini sağlamak amacıyla alüminyum, titanyum kullanılır. Bazı alaşımlarda alüminyum ve titanyumun yanında niobiyum kullanılır. Bunun sonucunda ise γ'' Ni_3Nb oluşur. Niobiyum dayanımlı alaşımlar (Inconel 718), çökelme-sertleşmesi sıcaklığını geciktirir. Kaynak sıcaklığının sertleşmeye neden olmaması ve ön kaynak çatlaması görülmemesi nedeniyle bu alaşımların kaynak kabiliyeti yüksektir [11,12].

Inconel 750, Inconel 600'ün bir çökelme çeşididir ve 540 °C'de Inconel 600'den yaklaşık üç kat daha fazla akma mukavemetine sahiptir. Çökelme dayanımlı alaşımlar için ısı işlemler, 600-815 °C'de, bir veya daha fazla çökelme işlemi takip eden 970-1175 °C'da bir çözelti işleminden ibarettir.

Çökelme dayanımlı süper alaşımların en önemli kullanım alanı uzay endüstrisidir. Ayrıca bu süper alaşımlar roket motorlarında, gibi uçak türbin parçalarında (disk, şaft, halka, pervane kanadı), değişik kompresörlerde ve nükleer reaktörlerde (cıvata, yay) kullanılır [3].

2. MALZEME: INKONEL

Inconel, Special Metals Şirketinin ostenitli nikel-krom-esaslı bir süper alaşım ailesine atfedilen tescilli bir ticari markasıdır. Inconel alaşımları, tipik olarak yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılırlar. İngilizcede genellikle "Inco" (veya bazen "Inconel") olarak anılır. Inconel'in yaygın ticari isimleri arasında şunlar bulunur: Inconel 625, Chronin 625, Altemp 625, Haynes 625, Nickelvac 625 ve Nicrofer 6020.

Inconel alaşım ailesi, ilk olarak, 1940'lı yıllarda, Whittle jet motorunun geliştirilmesi amacıyla Hereford, İngiltere'de Wiggin Works'teki araştırma ekiplerince geliştirilmiştir.

Alaşım 718, 1300 ° F'ye kadar olan sıcaklıklarda son derece yüksek verim, çekme ve sürünme kopma özelliklerini göstermek için tasarlanmış bir çökeltme ile sertleştirilebilen nikel bazlı alaşımdır. 718 alaşımının yavaş yaşlanma sertleşmesi tepkisi, ısıtma ve soğutma sırasında kendiliğinden sertleşme olmaksızın tavlama ve kaynamaya izin verir. Bu alaşım, alüminyum ve titanyum ile sertleştirilmiş nikel bazlı süper alaşımlara kıyasla mükemmel kaynaklanabilirliğe sahiptir.

Fiziksel Sabitler

Yoğunluk

lb/cu in 0,293

kg/cu m 8220

Erime aralığı: 2200-2450°F

Elektriksel özdirenc

ohms-cir mil/ft 728

microhm-mm . 1210

1210/1344°C

Tablo 1.1. İnkoneller ve bileşimleri

Inconel	Element (kütlece %)														
	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Cu	Al	Ti	Si	C	S	P	B
600	72,0	14,0-17,0	6,0-10,0				1,0	0,5			0,5	0,15	0,015		
617	44,2-56,0	20,0-24,0	3,0	8,0-10,0		10,0-15,0	0,5	0,5	0,8-1,5	0,6	0,5	0,15	0,015	0,015	0,006
625	58,0	20,0-23,0	5,0	8,0-10,0	3,15-4,15	1,0	0,5		0,4	0,4	0,5	0,1	0,015	0,015	
718	50,0-55,0	17,0-21,0	Denge	2,8-3,3	4,75-5,5	1,0	0,35	0,2-0,8	0,65-1,15	0,3	0,35	0,08	0,015	0,015	0,006
X-750	70,0	14,0-17,0	5,0-9,0		0,7-1,2	1,0	1,0	0,5	0,4-1,0	2,25-2,75	0,5	0,08	0,01		

2.1. Bileşim

Farklı Inconel'ler büyük ölçüde farklılaşan bileşimlere sahiptirler fakat tümünde de ana element nikel ikinci elementse kromdur. Inconel bileşimleri Tablo 2.2'de gösterildiği gibidir. Inconel 718 diğer inconel süper alaşımları ile kıyaslanması Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Inconel Elementleri

Element	Min	Max
Carbon	--	0,08
Manganese	--	0,35
Silicon	--	0,35
Phosphorus	--	0,015
Sulfur	--	0,015
Nickel + Cobalt	50,0	55,0
Chromium	17,0	21,0
Cobalt	--	1,00
Iron	Balance	
Aluminum	0,35	0,80
Molybdenum	2,80	3,30
Titanium	0,65	1,15
Boron	0,001	0,006
Copper	--	0,15
Cb + Ta	4,75	5,50

2.2. Özellikler

Inconel alaşımları, oksidasyon ve korozyona dayanıklı malzemeler olup basınç ve ısıya maruz istisnai çevrelerde kullanıma çok uygundur. Inconel, ısındığında kalın, istikrarlı, pasifleştirici bir tabaka meydana getirerek oksitlenmenin yüzeyde ilerlemesini önler. Inconel, geniş bir sıcaklık aralığında mukavemetini koruduğundan, alüminyum ve çeliğin ısı yüzünden kristal boşlukları oluşması sonucu direnemeyerek akışkanlaştıkları yüksek sıcaklık uygulamaları için caziptirler (Bakınız Arrhenius eşitliği). Inconel'in yüksek sıcaklık mukavemeti, alaşıma bağlı olarak katı solüsyon takviyesi veya çökeltme takviyesi ile geliştirilir. Yaşlandırarak sertleştirme veya çökeltme takviyesi türlerinde, nikel az miktarda niyobyum katılarak ara metalik bileşik Ni₃Nb veya gamma primer elde edilir. Gamma primer, yüksek sıcaklıklarda kayma ve akmayı önleyen küçük kübik kristaller meydana getirir.

2.3. İşleme

Inconel, hızlı işlem setleşmesi yüzünden geleneksel tekniklerle şekillendirilmesi ve işlenmesi güç bir metaldir. İlk işlem geçişinden sonra, işlem sertleşmesi, daha sonraki geçişlerde parça yada aletin plastik deformasyonuna sebep olabilir. Bu yüzden, 718 gibi Inconel'ler işlenirken sert bir aletle güçlü ama yavaş bir kesim uygulanarak gerekli geçiş sayısı asgariye indirilir. Alternatif olarak da, işlemin büyük bir kısmı parça solüsyon haldeyken gerçekleştirilerek sadece rötuşlar yaşlandırarak sertleştirme sonrasına bırakılır. Harici dişler bir torna yardımıyla "tek noktadan" çekilebilir veya bir vida makinesi yardımıyla dişler ovalanır. İç yüzeyinde diş bulunan delikler, paslanmaz çelikten dişli aksamın delik içine kaynatılması veya lehimlenmesiyle elde edilir. İç yüzeylerde diş meydana getirmek için EDM işlemi de kullanılabilir. Plaka kesilirken genellikle su jetli kesici kullanılır. İç yüzeyde bulunan dişler tornada tek nokta yöntemiyle açılabilir gibi bir işleme merkezinde freze ile de açılabilir. Nikel alaşımların işlenmesinde, yeni fırça takviyeli seramik kesiciler de kullanılabilir. Bunlar, tipik olarak, karbürü kesicilerden 8 kat daha hızlı malzeme çıkarırlar. Ayrıca, tanecik boyutunu artırmadan 1300 derece F'a indüksiyonla ısıtılarak tamamen yaşlandırılmış 718 Inconel'e ovalama yöntemiyle de diş açılabilir. Inconel parçalar bu yöntemler haricinde Seçimli lazer eritme yöntemiyle de elde edilebilirler.

2.4. Birleştirme

Isıdan etkilenen bölgede çatlama ve alaşım elementlerinin mikro yapısal ayrışması sebebiyle Inconel alaşımlara kaynak yapılması güçtür. Bununla beraber, bu sorunların üstesinden gelebilecek birçok alaşım tasarlanmıştır. En sık rastlanan kaynak yöntemleri, gaz tungsten ark kaynağı ve elektron huzmesi kaynağıdır [8].

Darbeli mikro lazer kaynaktaki son yenilikler de son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır.

2.5. Kullanım Alanları

Inconel, genellikle istisnai çevrelerde kullanılır. Genellikle gaz türbinli motorlarda türbin kanatları, contaları ve yanma odaları turbo şarjör rotorları ve contalarında kullanılır. Ayrıca elektrikli su altı kuyu pompaları motor şaftları, yüksek sıcaklık kiliteri, kimyasal işlem ve basınç kapları, eşanjör boruları, nükleer basınçlı su reaktörlerindeki buhar jeneratörleri, H₂S ve CO₂ gibi safsızlıklar içeren doğal gazın işlenmesi, ateşli silah susturucusu patlama tamponları ve Formula Bir ve NASCAR egzost

sistemlerinde kullanılırlar. Inconel'in atık yakma fırınlarının kazanlarında kullanımı gittikçe artmaktadır. Joint European Torus kazanı Inconel'den yapılmıştır. Inconel 718, genellikle, kriyojenik depolama tanklarında, kuyu içi şaftlarda ve kuyu başı parçalarda kullanılır.

Kuzey Amerika Havacılığı, X-15 roket uçak yüzeyini "Inconel X" diye bilinen bir Inconel alaşımıyla kaplamıştır.

Rocketdyne Saturn V Ek motorunun ilk aşamasında kullanılan F-1 roket motorunun güç üretme hücresinde Inconel X-750'yi kullanmıştır.

Ayrıca Inconel, yeni süper arabaların McLaren MP4-12C ve Koenigsegg Agera'nın hafif spor egzozlarında da kullanılmaktadır.

Ayrıca Inconel, yüksek uçlu ateşli silahların susturucuları ve namlu ağzı cihazlarında da kullanılmaktadır. Bu özellikle, küçük veya makineli tüfeklerle kullanım için tasarlanan susturucularda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Haddelenmiş Inconel, sıklıkla, uçaklardaki kara kutu kayıt cihazlarında kazıyıcı kayıt ortamı olarak kullanılmaktaydı

Fırça, kolon, reaktör ve boru gibi kimyasal uygulamalarda Inconel kullanım alternatifleri, Hastelloy, perflüoroalkoksi (PFA) ailesinden karbon çeliği veya fiberle güçlendirilmiş plastiktir.

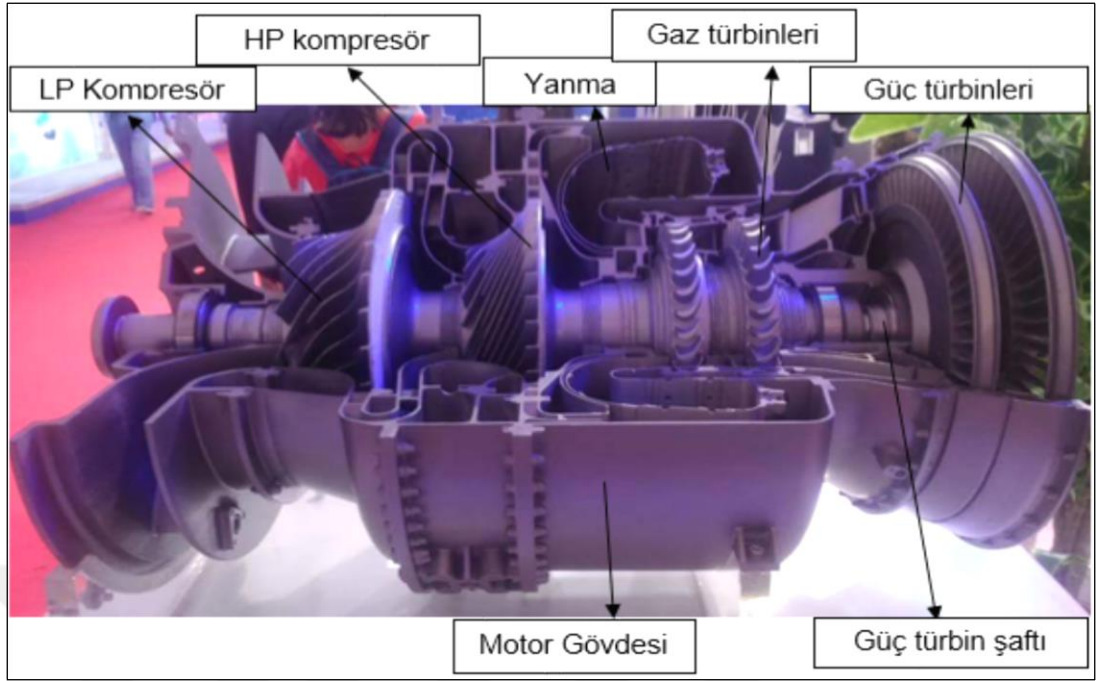
2.6. Süper Alaşımların Uygulama Alanları

Süper alaşımların en fazla uygulamaları uçak ve gaz türbinleri için malzemelerdir. Bununla beraber bu malzemeler uzay araçlarında, roket motorlarında, deneysel uçaklarda, nükleer reaktörler, deniz altılar, buhar güç fabrikalarında, petrokimyasal ekipmanları ve diğer yüksek sıcaklık uygulamalarında da kullanılır. Özellikle 700°C'nin üzerinde uzun süre dayanımlarının önemli bir bölümünü koruduklarından dolayı bu uygulama alanlarının gereksinimlerine uygundur. Ni esaslı süper alaşımların bu kadar fazla kullanılmasının temel nedeni ise jet motoru içinde 40 atmosfer seviyesine çıkabilen basınç ile 1500°C'lere çıkan sıcaklıktaki işlem koşullarıdır. Özellikle yüksek ısıya karşı yüksek dirençlerinden dolayı uçak türbinlerinin türbin ve pervane kanatları, yanma odası astarları, bağlantı bölümleri vb. bölümlerinde kullanılmak üzere geliştirilen ve "süper alaşımlar" olarak bilinen

alaşımlar vardır. Bu alaşımlar genellikle, nikel esaslı alaşımların direncini önemli ölçüde geliştiren molibden, tungsten, niyobyum, alüminyum, titanyum vb. elementleri içerirler [13].

Nikel bazlı süper alaşımlar, yüksek oranda nikel sayesinde kararlı bir içyapı oluştururlar ve nikel sayesinde indirgeyici (asidik) ortamlarda korozyon dayanımları artar. Krom ilavesi ise bu alaşımlara, sertlik, oksitleyici ortamlarda korozyona ve oksidasyona dayanımı daha da artar. Bunun sonucu olarak da alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda korunan mukavemet, iyi bir işlenebilirlik, korozyon ve oksidasyona karşı iyi bir dayanım kazanırlar. Özellikle 700 °C'nin üzerinde uzun süre dayanımlarının önemli bir bölümünü koruduklarından dolayı yüksek sıcaklık uygulama alanlarının gereksinimlerine uygundur ve bu nedenle kullanım alanı genişlemektedir. Kullanım alanına bağlı olarak ihtiyaçları karşılaması için nikel bazlı süper alaşımlar içerisine Mo, Co, Nb, Zr, B, Fe ve diğer elementler eklenmektedir.

Günümüzde 100 den fazla farklı çeşitte nikel bazlı süper alaşım mevcuttur. Bu alaşımların en yaygın kullanım alanları başta uçak ve roket motorları olmak üzere Süper alaşımlar yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle genellikle uçak parçaları, kimyasal ekipmanlar ve petrokimya ekipmanları olarak kullanılır. Süper alaşımların yaygın olarak kullanıldığı uygulama alanları; Uçaklar ve endüstriyel gaz türbinleri Diskler, Cıvatalar, Şaftlar, Muhafaza kapları, Pervane kanatçıkları, Vanalar, Yanma odaları Gaz türbini santralleri: Cıvatalar, Pervane kanatçıkları, Gaz ısıtıcıların bacaları. Motorlar: Turbo yükleyiciler, Egzoz valfleri, Isıtma elemanları, Valflerde ve contalar Metal işçiliği: Sıcak işleme takımları ve kalıplar, Döküm kalıplar. Tıbbi uygulamalar: Dişçilik, Protezçilik ekipmanları Isıl işlem ekipmanları: Tepsiler; Karıştırıcılar, Konveyör bantları Nükleer güç sistemleri: Hareket mekanizmaları için kontrol çubukları, Akış valfleri, Yağlar Uzay araçları: Aerodinamik araç zırhları, roket motor parçaları. Kimyasal ve petro-kimya sanayisi: Cıvatalar, Valfler, Reaksiyon kapları, Borular, Pompalardır.



Şekil 2.1. Kesiti alınmış gaz türbinli motor

2.7. Inconel Alaşımları

- Inconel 600: Güçlendirilmiş katı solüsyon
 - Inconel 625: Aside dirençli, iyi kaynak yapılabilir
 - Inconel 690: nükleer uygulamalar için düşük kobalt içeriği ve düşük direnç
 - Inconel 718: Gamma duble primer takviyeli ve iyi kaynak yapılabilme özelliklerine sahip
 - Inconel 751: 1600°F aralığında kopma mukavemetini artırmak için alüminyum içeriği artırılmış
 - Inconel 792: Yüksek sıcaklıkta korozyon özelliklerini geliştirmek için alüminyum içeriği artırılmış ve özellikle gaz türbinlerinde kullanılmaktadır
 - Inconel 939: Gamma primer takviyeli ve iyi kaynak yapılabilme özelliklerine sahip
- [14].

3. MALZEME AŞINDIRICILAR

3.1. Aşındırıcı Partikül Özellikleri

3.1.1. Alümina mineralinin özellikleri

Alumina (AL_2O_3) Şekil 3.1' de görüldüğü gibi alüminyum metalinin oksitlenmiş halidir. Doğal alümina feldispat, kil ve silikalarda bulunur. Boksit, diaspor, kriyolit, sulminat, kyait, nefelit, gibi minerallerde de az miktarda bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Alümina minerali ve doğadaki görünümü

Alüminanın bilimsel olarak keşfi 20.yüzyıldadır. 1907 yılında ticari kullanımına bir patent ile başlanmıştır ve geniş çapta yayılması ise 1920-1930 yıllarını bulmuştur. Ergime sıcaklığı 1200 derece civarı olan alüminyum oksit, düşük sıcaklıklarda mekanik ve kimyasal bozunmaya karşı en dayanıklı refrakterlerden birisidir. İyi kalsime edilmiş bir alümina malzeme hem mineral asitlerde hem de bazlarda çözünmez. 1700-1800 derece gibi yüksek sıcaklıklarda flor dışında tüm gazlarda karşı dirençlidir. Oksitleyici ve redükleyici atmosferlerde 1900 dereceye kadar kullanılır. Alümina, düşük sıcaklıklarda birden fazla kristal yapıda bulunabilir. Bu formlar 750-1200 derece aralarında atmosfere bağlı olarak α -Alümina'ya dönüşür ve bu dönüşüm tersinir değildir. Tablo 3.1' de alümina mineralinin kimyasal içeriği, fiziksel özellikleri ve tane boyutları verilmiştir.

Alümina'dan porozite ve yoğun ürünler yapılır. Poroz ürünler genellikle ergimiş Alümina'dan yapılır ve 1900 dereceye kadar fırın astarlarında kullanılır. Yoğun alümina, ergimiş alüminadan daha saftır. Ergimiş alümina %99,8 AL₂O₃ bulunur. Bu oran arttıkça sıcak mukavemet, elektrik direnci ve aşınma direnci artar.

Alümina malzemesi slip dökümü, ekstrüzyonla, enjeksiyon kalıbı ile, soğuk ve sıcak presle şekillendirirler. Şekillendirmede polvinil, alkol, reçine, mum, lateks gibi bağlayıcılar kullanılır [10].

Tablo 3.1. Alümina mineralinin özellikleri

KİMYASAL İÇERİK (%)			
	Minimum	Maksimum	Tipik
Kızdırma Kaybı/LOI, 1000°C	0,5	1	0,7
Al ₂ O ₃	99	-	99,1
SiO ₂	-	0,02	0,01
Fe ₂ O ₃	-	0,02	0,008
Na ₂ O	-	0,3	0,15
CaO	-	0,02	0,007
FİZİKSEL ÖZELLİK			
Sipetik Yüzey, BET (m ² /g)	70	90	80
Alfa Alümina (%)	20	30	25
Yığılma Açısı (°)	32	36	34
Mutlak Yoğunluk (gr/cm ³)	3,3	3,6	3,45
Yığın Yoğunluğu (gr/cm ³)	1	1,1	1
TANE BOYUTU			
d ₅₀ (µm)	55	85	75
<45 µm (%)	-	30	-
>150 µm (%)	-	7	-

3.1.2. Alümina mineralinin kullanım alanları

1. Seramik Endüstrisi
2. Refrakter Endüstrisi
3. Birincil Alüminyum Üretimi
4. Seramik Kesici Üretimi
5. Cam Endüstrisi
6. Öğütücü Malzeme Üretimi
7. Şeffaf Zırh Üretimi

3.1.3. Çelik bilye özellikleri

Çelik bilyeler Şekil 4.4' de görüntüleri verildiği gibi uzun ömürlü oluşu, kısa sürede istenen sonucu vermesi sayesinde maliyet avantajı sağlar ve uygulanan yüzeylerde parlak ve paslanmaz bir parlaklık sağlar. Kumlama makinasının aşınmasını nispeten geciktirir. Temizleme, yüzey profilini geliştirme / iyileştirme işlemlerinde olmak üzere

her tür alüminyum döküm parçalarda, basınçlı dökümle üretilen zamaklarda, demir dışı metallerde, özel alaşımlarda ve paslanmaz çelik dökümlerde sağladığı avantajlar sebebi ile kullanılması gereken tek kumlama abrasividir. Tablo 4.4' de çelik bilyelerin fiziksel, kimyasal özellikleri ve tane boyutları verilmiştir.

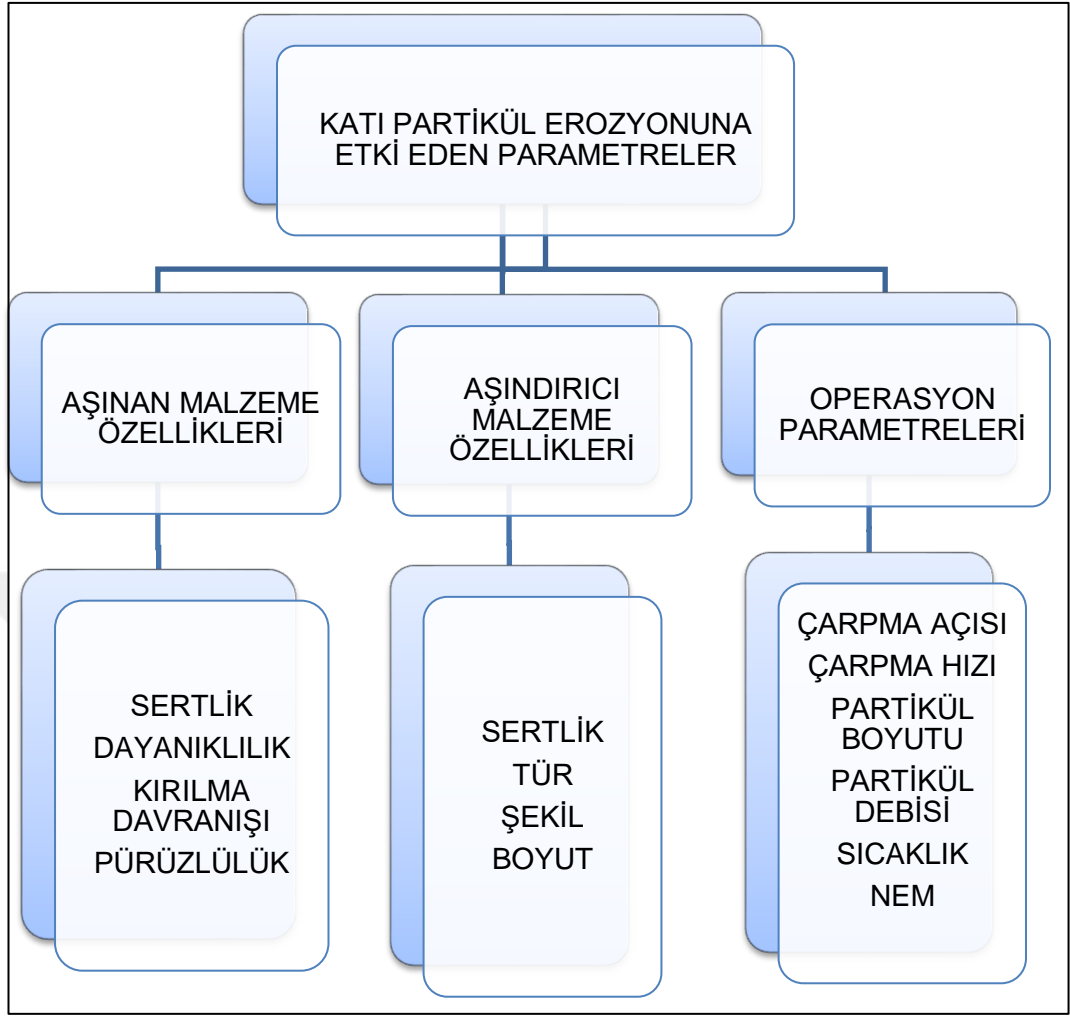


4. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Aşınma temel olarak malzeme yüzeyinde meydana gelen kayıp olarak tanımlanabilir. Farklı boyut, şekil ve kimyasal yapıdaki maddeler bu aşınmaya sebep olabilir bu yüzden aşınmaya etki eden birçok parametreden söz edilebilir. Aşınma anlık bir durum olabileceği gibi daha çok bir süreç olarak değerlendirilir. Aşınma genel olarak aşındırıcının katı, sıvı veya gaz halinde olmasına göre sınıflandırılmıştır. Farklı hızlarda farklı geometrik boyutlardaki tanecikler, temasta buldukları katı yüzeylerde darbe etkisi yapar ve malzeme kaybı gerçekleşir. Aşınma bilimi bu kaybın sebeplerini, oluşum aşamalarını, parametrelerini, sonuçlarını inceleyen bir bilim dalı olarak düşünülmelidir. Hızın ve hareketin olduğu ortamlarda aşınmadan bahsedilebilir. Aşınmanın direkt olarak negatif sonuçları arasında parça değişimi gerektirmesi, iş ve zaman kaybı, enerji kaybı, üretimin azalması gösterilebilir. Dolaylı sonuçlar arasında ise insan hayatını tehdit eden problemlere sebep olabilir.

Tüm sanayi türlerinde üretimde kullanılan materyallerin aşınma davranışlarının incelenmesinin ticari ve teknolojik önemi büyüktür. Aşınma ile ilgili çalışmalar 1950 li yıllarda başlamış, sistematik çalışmalar ise 1960'lı yıllarda sanayi ülkelerinde yapılmıştır. Aşınma uzun süredir bilimsel araştırmalara konu olmasına rağmen halen endüstriyel uygulamalarda bir problem olarak ortaya çıkması aşınmanın kompleks bir süreç olduğunun kanıtıdır [15].

Katı partikül erozyonu ise bu aşınma süreçlerinden biri olup aşındırıcı madde ile hedef malzeme arasındaki temasın devam ettiği sıvı erozyonu, bulamaç erozyonu ve kavitasyon(buhar) erozyonu gibi diğer tribolojik süreçlerden farklıdır[18]. Katı partikül erozyonu oluşma süreci farklı parametrelere bağlıdır. Bu parametreler temel olarak; hedef malzemenin özellikleri, aşındırıcı partikül özellikleri ve operasyon parametreleri olarak üç ana başlık altında incelenmektedir. Bu parametreler sayesinde istenen değişiklikler yapıp hedef malzemelerin katı partikül erozyonu davranışları karakterize edilmektedir. Bu ana parametreler ve alt bileşenleri Şekil 4.4'de şematik olarak verilmiştir.

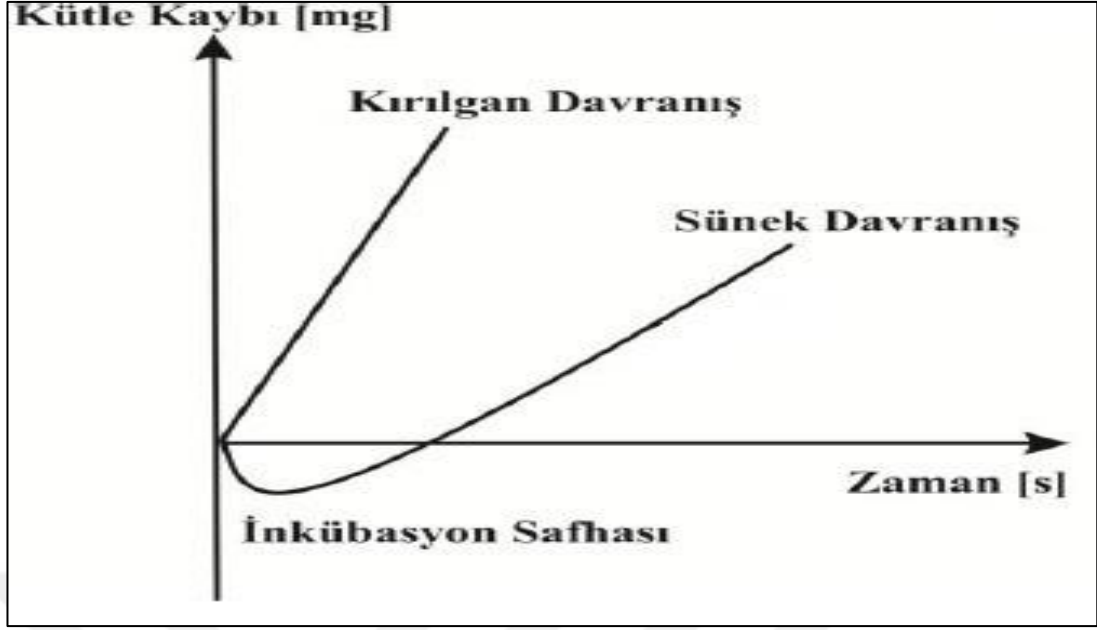


Şekil 4.1. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler

4.1. Aşınan Malzeme Özellikleri

Katı partikül erozyonunda, aşınan malzemenin fiziksel özellikleri yanı sıra sertliği dayanıklılığı ve kırılma davranışlarının bilinmesi ve yüzey pürüzlülüğünün tespit edilmiş olması yapılan deneylerde ve elde edilen sonuçların yorumlanmasında önemli faktörlerdir. Örneğin: fiziksel özellikleri aynı iki numuneden düz bir yüzeye sahip olanda kütle kaybı yaşanırken pürüzlü yüzeyde kütle artışı görülebilir.

Aşınan malzemenin sünek veya gevrek olması ise katı partikül erozyonuna etki eden önemli parametrelerden biridir. Sünek ve gevrek iki malzeme diğer tüm parametreler aynı iken farklı erozyon karakteristikleri sergilemektedir.



Şekil 4.2. Zaman-kütle kaybı grafiği [16]

Kütle kaybının zamanla değişiminde kırılkan ve sünek malzemeler farklı davranış gösterirler. İlk anda kırılkan davranış lineer bir artış gösterirken sünek davranış kütle kaybı ekseninde eksi(-) tarafa geçer. Bu sünek malzemenin ağırlığının artması ve aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme üzerine gömülmesi anlamına gelmektedir. Kütle kaybı olması beklenen malzemede tam aksine kütle kazancının olduğu bu periyoda inkübasyon periyodu denir. Bir müddet sonra inkübasyon periyodu biter aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyini terk etmeye başlar. İnkübasyon döneminden sonra sünek malzemeler de kırılkan malzemelerdeki gibi lineer bir kütle kaybı görülmeye başlanır.

Tablo 4.1. Malzeme erozyon davranışları

Malzeme Türü	Erozyon Davranışı
Cam, Seramik, Gevrek Polimer	Çatlak Oluşumu, Gevrek Kırılma
Polimer, Sünek Metaller, Fiber Takviyeli Polimerler	Kesme ve Sürülme
Kauçuk, Plastik Esaslı	Yorulma, Yırtılma

Tablo 4.1'de malzeme erozyon davranışları verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan inconel 718 sünek malzeme özellikleri göstermektedir.

4.2. Aşındırıcı Madde Özellikleri

Aşındırıcı malzemenin fiziksel özellikleri katı partikül erozyonuna direkt etki eden parametrelerdendir. Keskin kenarlı aşındırıcı partiküller kesme, kırılma, parçalama

gibi deformasyonlara sebep olurken küresel şekilli partiküller plastik deformasyona sebep olmaktadır. Aşındırıcı partikülün boyutları ise hedef malzemenin özellikleri de düşünülerek belli bir kritik değere kadar erozyonu artırmakta sonrasında sonuca etki etmemektedir [20].

4.3. Operasyon Parametreleri

Operasyon parametreleri malzemenin servis esnasında karşılaştığı değişkenlerin tamamını kapsar. Bu parametreler kullanıcıya değişiklik yapıp hedef malzemenin katı partikül erozyonu davranışlarının karakterize edilmesi imkanı sağlar.

4.3.1. Aşındırıcı partiküllerin hızı

Hedef malzemeye ulaşan bir partikülün hızı erozyon karakteristiğine direkt etki eden parametrelerdendir. Aşınan malzemenin özellikleri ve çarpma açısına da bağlı olarak çok düşük hızlarda erozyon davranışı göstermeyip malzeme yüzeyinde yorulmaya sebep olur. Hızın artmasıyla erozyon gözlemlenmeye başlanır. Partikül hızının çok yüksek olması da hedef malzeme üzerinde krater açılmasına veya tamamen delinmesine sebep olabilir.

Amir Mansouri, Hadi Arabnejad Khanouki, Siamack A. Shirazi, Brenton S. McLaury yaptıkları erozyon araştırmalarında 75,150,600 µm luk kum partiküllerini ve 75,150,600 µm luk cam partiküllerini 46 m/s,65 m/s,79,5 m/s,91,85 m/s,102,71 m/s ve 112,5 m/s hızlarındaki hava akışı içerisinde püskürterek partiküllerin hızlarını parçacık izleme hız ölçüm tekniği (PTV) ile izlemişlerdir. Yaptıkları gözlemler sonucu partikül hızının artmasının endüstriyel malzemelerde erozyonu artırdığını ifade etmişlerdir [13].

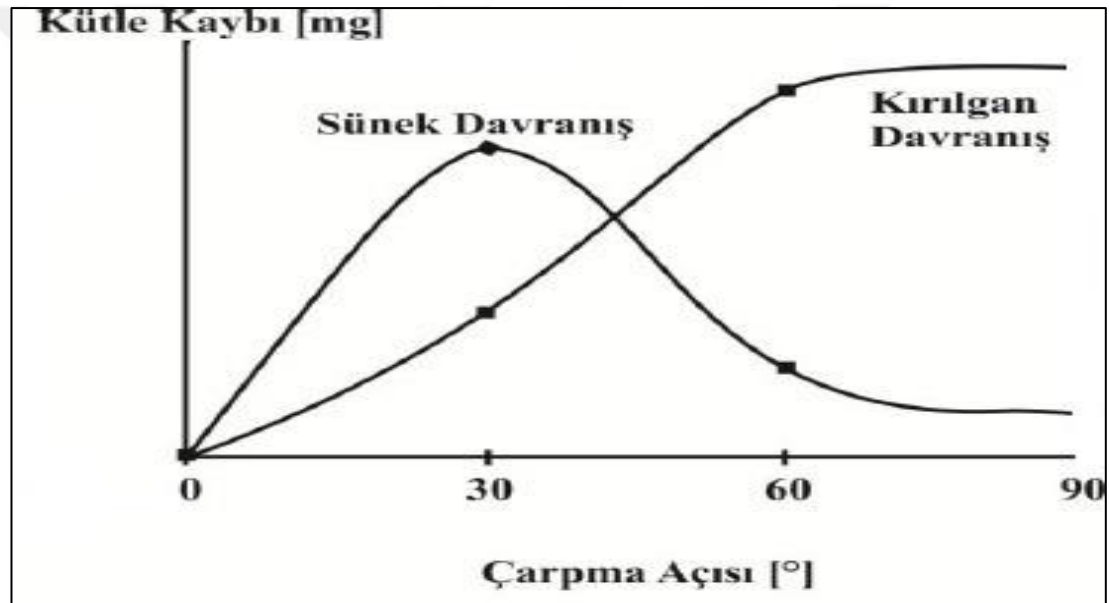
R. A. Shakoor, Paul Okonkwo, A. M. Mohamed yaptıkları erozyon deneylerinde boru hattı çeliği APIX120 üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalar sırasında partiküller 43-167 m/s hız aralığında, değişik açılarda ve 0-10 dakika süre aralığında hedef malzemeye uygulanmıştır. Testler oda sıcaklığında yapılmış ve aşındırıcı olarak alümina kullanılmıştır. Farklı hızlardaki numunelerin erozyon davranışları incelenmiş elektron mikroskobu ve profilometre yardımıyla yüzey analizleri yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde düşük hızlarda plastik deformasyonun ve gömülme eğiliminin baskın olduğu yüksek hızlarda ise kırılma, kopma, kesilme, mekanizmalarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir [17].

Bu çalışmalar neticesinde diğer parametreler sabitken partikül hızının artırılması ile kütle kaybı artmakta, bu da hız ve erozyon eğilimlerinin arasındaki pozitif korelasyonu göstermektedir.

4.3.2. Partikül çarpma açısı

Partikül çarpma açısı katı partikül erozyonunda en değişken parametrelerden biridir. Literatürde çarpma açısı iki temel unsura ayrılmıştır; 90° lik çarpmalar dik açılı çarpma olarak, bunun dışındaki açılar eğik açılı çarpma olarak kabul edilmiştir.

Düşük çarpma açılarında aşındırıcı partiküller hedef yüzeye daha uzun süreli temas etmekte buda yumuşak yüzeyler için kütle kaybını arttırmaktadır.



Şekil 4.3. Açı değişimi-kütle kaybı grafiği [16]

Şekil 4.3'de kırılman ve sünek malzemelerin açı değişimi ile uğradıkları kütle kayıpları birlikte gösterilmiştir. Düşük çarpma açılarında kırılman malzemeler sünek malzemelerden daha az kütle kaybına uğrarlar. Açı arttıkça ve 90° ye yaklaştıkça kırılman malzemenin kütle kaybı sünek malzemedan daha fazla olmuştur. Y.I.Oka,H.Ohnogi,T.Hosokawa,M.Matsumura aşınma konusunda 325µm boyutlu silika kum parçacıklarıyla 3° den 90° ye kadar çarpma açılarında 130 m/s hıza kadar beş adet metalik, bir adet seramik, bir adet plastik malzeme üzerinde belirtilen parametrelerle deneyler yapmıştır. Yaptıkları deneylerde partikül hızı 50-130 m/s arasında değiştirilmiş, nozul çapı değiştirilerek partikül debisi artırılmış buna rağmen

20° den daha düşük açılarda diğer parametreler ne kadar artırılsa da numunelerin erozyon davranışlarında kayda değer bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir [18].

Md. Aminul Islam Zoheir N.Farhat eriyik alüminyum oksitle APIX42 çeliği üzerinde deneyler yapmıştır. Çalışma parametreleri partikül debisi 160g/min, partikül hızları 36m/s, 47m/s, 56m/s, 81m/s ve partikül çarpma açıları 30°, 45°, 60° ve 90° olarak belirlenmiştir. Yaptıkları testler sonucunda düşük partikül hızlarında darbe açısıyla erozyonun ters orantılı olduğunu gözlemlemiştir [19].

Erozyon aşınmasındaki kütle kaybı çarpma açısının bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünde sünek ve kırılğan malzemeler farklı özellikler göstermektedir. Sünek malzemelerin karakteristik özelliği düşük çarpma açılarında (15°-30°) maksimum erozyon göstermeleridir. Kırılğan malzemeler maksimum erozyon davranışını normal çarpma açılarında (90°) gösterirler. Fiber takviyeli kompozitler, maksimum erozyonun 45°-60° çarpma açıları arasında ortaya çıktığı yarı-sünek davranış gösterirler [10].

4.3.3. Aşındırıcı partiküllerin boyutu

Bir cismin boyutlarının artması üzerinde taşıyabileceği kinetik enerji miktarını arttırmaktadır. Katı partikül erozyonunda aşındırıcı partiküllerin boyutlarının artması erozyon oluşturma ihtimalini artırır fakat bu artış lineer olmayıp başta hedef malzemenin özellikleri olmak üzere diğer parametrelere de bağlıdır. Hedef malzemenin sünek, gevrek veya yarı-sünek olması partikül boyutunun etkilerini önemli ölçüde değiştirmektedir.

G. Sundararajan, D.P. Mondal, M. Dünder yaptıkları çalışmada pirinç-bakır alaşımından oluşan sünek bir malzeme üzerinde partikül boyutunun erozyon oranına etkisini incelemiştir. Boyutları 5-25µm arasında olan silika aşındırıcılar kullanılmış, sonuçlar SEM ve AFM analizleriyle incelenmiştir. Başlangıçta partikül boyutu arttırıldıkça erozyon oranı artmıştır. Partikül boyutu bir eşik değerine ulaştıktan sonra boyut artışının erozyona etki etmediği görülmüştür [3].

V.B.Nguyen, Q.B.Nguyen, Y.W.Zhang, C.Y.H.Lim, B.C.Khoo yaptıkları çalışmalarda içinde kum partikülleri bulunan suyu 30m/s sabit hızla hareket ettirmiş. Parçacık boyutlarını 50, 80, 150, 350, 450, 700 µm olarak belirlenmiş ve bu parametrelerle aşınma deneyi gerçekleştirmişlerdir. Daha küçük boyutlardaki partiküllerin akışkan hızına daha çabuk tepki verdiğini büyük partiküllerin geç hızlandığını belirlemiştir.

Deneylemlerden sonra yüzey profilleri incelendiğinde partikül boyutları arttıkça yüzeyde oluşan erozyon miktarının arttığını belirlemişlerdir [2].

4.3.4. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debisi

Hedef malzemeye temas eden aynı fiziksel özelliklere sahip her bir aşındırıcı partikülün deney ortamında aynı etkiyi yaptığı düşünülür. Malzeme servis esnasındayken bu etkiler deney ortamından farklı olur. Aşındırıcı partiküller hedef malzemeye ulaşmadan ve ulaştıktan sonra birbirlerini etkilerler. Hedef malzemeye doğru ilerleyen iki partikülden arkadaki öndekine çarptığında kinetik enerjisinin bir kısmını öndekine aktarır bunun sonucu olarak arkadaki partikül yavaşlar öndeki hızlanır. Buna benzer bir etki partiküller hedef malzemeye çarptıktan sonra da görülür. Hedef malzemeye çarpıp geriye dönen bir partikül henüz hedef malzemeye ulaşmamış partiküllere çarparak hızlarının düşmesine belki de hedef malzemeye hiç ulaşamamalarına sebep olur.

Bu etkilerden dolayı partiküllerin kütleli debisi erozyona etki eden faktörler arasında kabul edilmiştir. Partikül debisi birim zamanda hedef malzeme üzerindeki birim alana çarpan partiküllerin toplam kütleli debisidir. Partikül debisi değişimi birincil bir etken olmayıp partikül boyutunun büyümesi, nozul çapının genişletilmesi, hızın veya akışın artması vb. parametrelerin değişmesi sonucu ortaya çıkar.

Anand K, Hovis S. K, Conrad H, Scattergood R.O. yaptıkları çalışmada partikül debisinin erozyona olan etkilerini incelemiş, geliştirdikleri parçacık çarpışma modelinde başlangıçta debi artışının erozyonu arttırdığını ama kritik bir değerden sonra erozyon oranını arttırmadığını gözlemlemişlerdir. Bu kritik değerinde partikül boyutu, partikül hızı, partikül açısı ve aşınan malzemenin kırılma davranışı gibi diğer parametrelere bağlı olduğunu belirlemişlerdir [20].

4.3.5. Sıcaklık ve nem

Sıcaklık ve nem her zaman doğrusal orantılı artmasa da çoğu durumda birbirlerini tetikleyen iki parametredir. Erozyona maruz kalan bir malzemenin sıcaklığı ve ortamın nemi erozyon davranışlarını değiştirir. Sıcaklığı artan bir malzeme genişler ve sünek bir özellik kazanır soğuyan bir malzeme ise büzülür ve kırılma artar. Nem beraberinde korozyonu getirdiğinden nemli ortamda uzun süre kalmış bir malzemenin erozyona uğrama ihtimali artar.

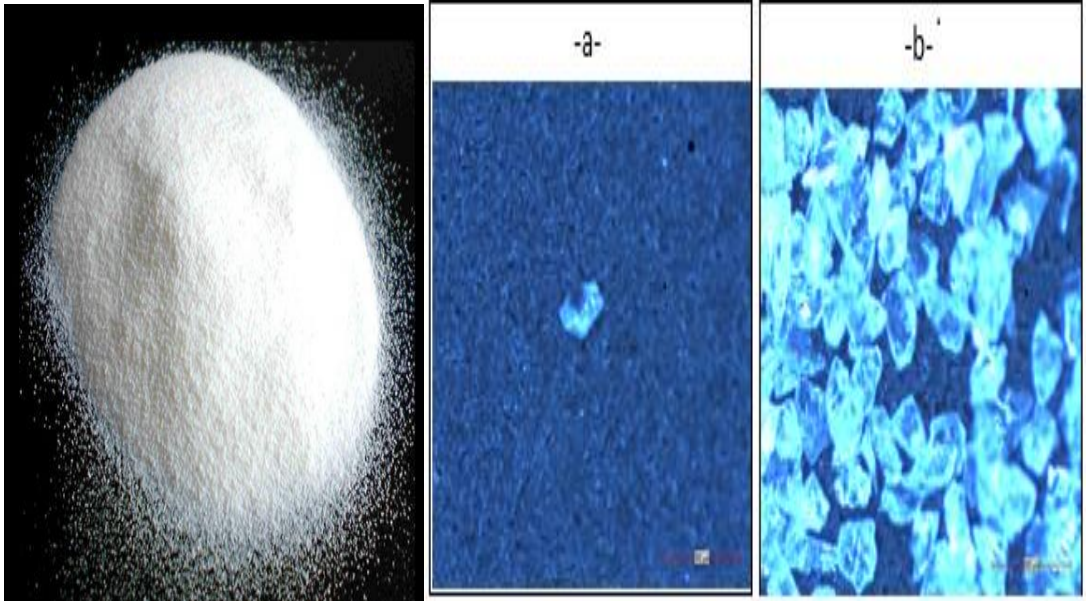
Oğuzhan GÜNGÖR, Sibel TAŞ, Nazif Deniz GÜLTEKİN, Uğur GÜNEŞ., Ahmet TÜRK yaptıkları çalışmada sıcaklığın erozyona etkisinin anlaşılması için partiküllerin ısıtılarak hedef malzemeye gönderilmesi için deney düzeneği oluşturmuş. Sıcaklık dayanımını iyi olması sebebiyle silisyum karbür aşındırıcı olarak kullanılmıştır [8]. Partiküllerin ısındığında genişmesi ve yumuşaması erozyon oranını azaltır. Partikül ve hedef malzeme arasındaki yüksek ısı farkı partiküllerin hedef malzemeye yapışmasına neden olabilir bu durumda kütle artışı gözlemlenebilir.

4.3.6. Aşındırıcı partiküllerin özellikleri

Aşınma deneylerinde aşındırıcı partikül olarak alümina kullanılmıştır. Partikül boyutu 80 mesh olarak belirlenmiştir. Köşeli ve sert ve keskin kenarlı yapısıyla sıklıkla aşınma deneylerinde kullanılmaktadır.

Tablo 4.2. Alümina aşındırıcının fiziksel özellikleri

Kimyasal formül	Al ₂ O ₃
Molarkütle	101.96 g-mol ⁻¹
Yoğunluk	3.987g / cm ³
Erime noktası	2,072 ° C (3,762 ° F; 2,345 K)
Kaynama noktası	2,977 ° C (5,391 ° F; 3,250 K)
Sudaki çözünürlük	Çözünmez
Koku	Kokusuz
Görünüm	Beyaz Katı
Boyut	80 Mesh-177 Micron



Şekil 4.4. Alümina numunesi ve elektron mikroskobu görüntüsü

4.3.7. Aşındırıcı partikül debisinin ölçülmesi

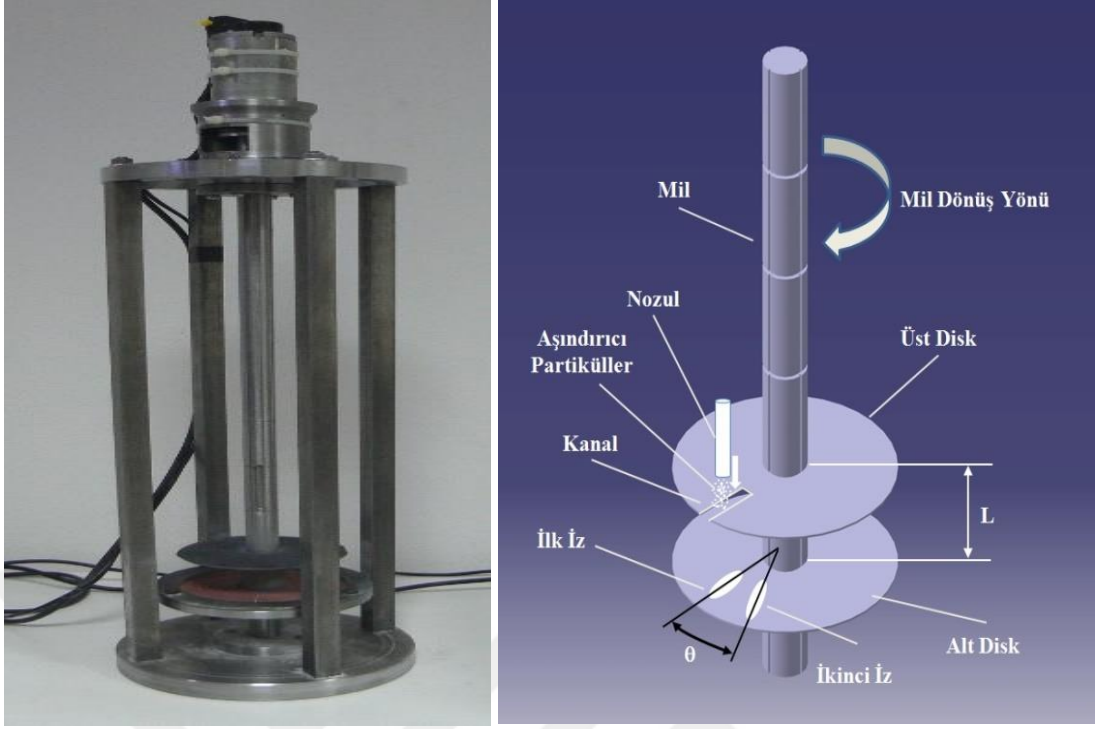
Aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcılar debiye bağlı olarak farklı sonuçlar vermektedir. Bu yüzden aşındırıcı debisinin ölçülmesi gerekmektedir. Aynı test cihazı kullanılarak yapılan yüksek lisan tez çalışmalarına alümina aşındırıcılar iki farklı basınçta (1,5 ve 3 bar) püskürtülmüştür. Partiküller (5 ve 10 sn.) olmak üzere iki farklı sürede püskürtülmüştür. Bu parametreler sonucunda dört farklı debi ölçümü gerekmektedir. Debi ölçümlerinden elde edilen değerler, debi değişiminin hibrit kompozitlerde katı partikül erozyonuna etkilerini analiz etmek için kullanılmıştır. Nozuldan püskürtülen aşındırıcı partikül miktarının süreye oranı her bir parametre için debiyi vermektedir. Debi ölçümleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Debi ölçümleri

Basınç	Süre	Partikül Miktarı	Debi
1,5 bar	5 sn	50,14 gr	10,028 gr/sn
1,5 bar	10sn	100,36 gr	10,036 gr/sn
3 bar	5sn	85,20 gr	17,040 gr/sn
3 bar	10sn	170,55 gr	17,055 gr/sn

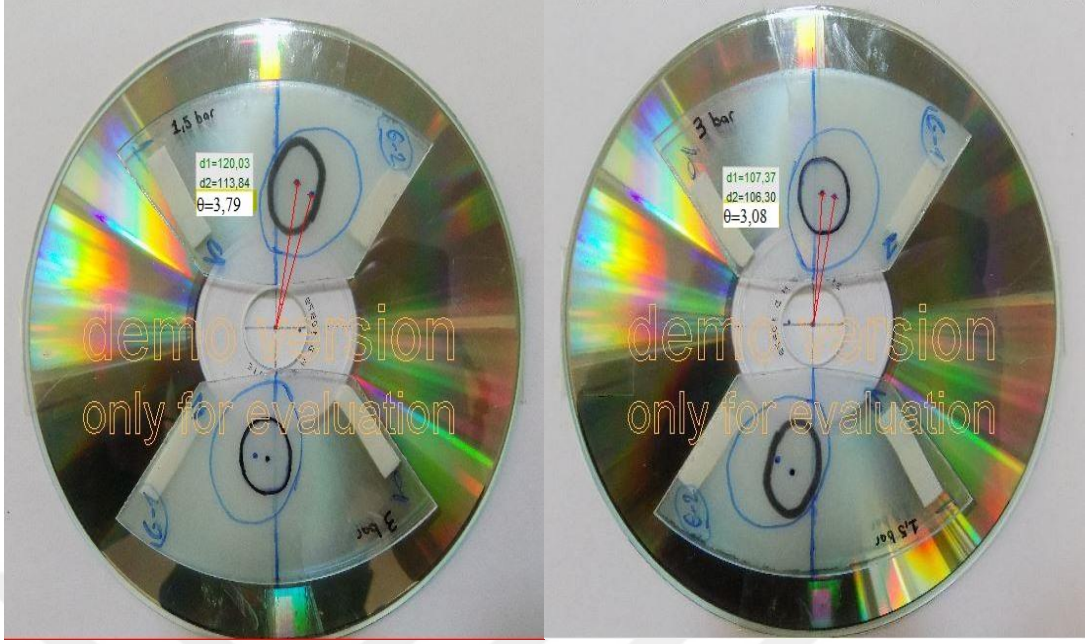
4.3.8. Aşındırıcı partikül çarpma hızlarının çift disk yöntemi ile ölçülmesi

Aşındırıcı alümina partiküller 1,5 ve 3 bar basınçla püskürtülmüş 2 farklı partikül hızı ortaya çıkmıştır. Partikül hızlarının ölçümü çift disk yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar çift disk metodu için özel olarak üretilmiş cihaz ile yapılmıştır.



Şekil 4.5. Çift disk metodu cihazı [21]

İlk aşamada mil dönmüyorken dik açıyla aşındırıcı partiküller üst diskteki aralıktan alt diske yapıştırılan şeffaf disk numunelerine püskürtülür ve ilk iz oluşur. İkinci aşamada mil istenen devirde döndürülür, tekrar püskürtme işlemi yapılır ve ikinci iz oluşur. Bu şekilde ilk iz ve ikinci iz oluştuktan sonra hız hesaplama işlemi yapılır. Bu tez çalışmasında devir hızı 2000 rpm olarak ayarlanmıştır. Sürenin hesaplaması için θ açısının (ilk iz ile ikinci iz arasındaki açı)'nın bilinmesi gerekmektedir. Açı ölçümü yapılırken bu iki izin merkez noktaları esas alınır. Şeffaf disk numuneleri ortak bir merkeze göre konumlandırılır ve yüksek çözünürlükle taramaları yapılır. MB-Ruler açı ölçme programı ile θ açısı bulunur.



Şekil 4.6. 1.5 bar (solda),3 bar (sağda) açı ölçüm diskleri [10]

Yapılan ölçümler sonucunda 1.5 bar püskürtme basıncı için θ açısı $3,79^\circ$ olarak,3 bar püskürtme basıncı için θ açısı $3,08^\circ$ olarak tespit edilmiştir.

Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresi aşağıdaki formülle hesaplanır.

t = partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresi (s)

θ = İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı ($^\circ$)

n = mil devir hızı (rpm)

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (4.1)$$

θ açısı ve mil devir hızı bilindiğine göre t süresi hesaplanabilir. Bu çalışmada 1,5 bar püskürtme basıncı için t süresi;0,000315 sn olarak 3 bar püskürtme basıncı için t süresi;0,000256 sn olarak hesaplanmıştır.

V = partikül çarpma hızı ($m.s^{-1}$)

L = diskler arası mesafe (m)

t = partiküllerin üst diskten alt diske ulaşma süresi (s)

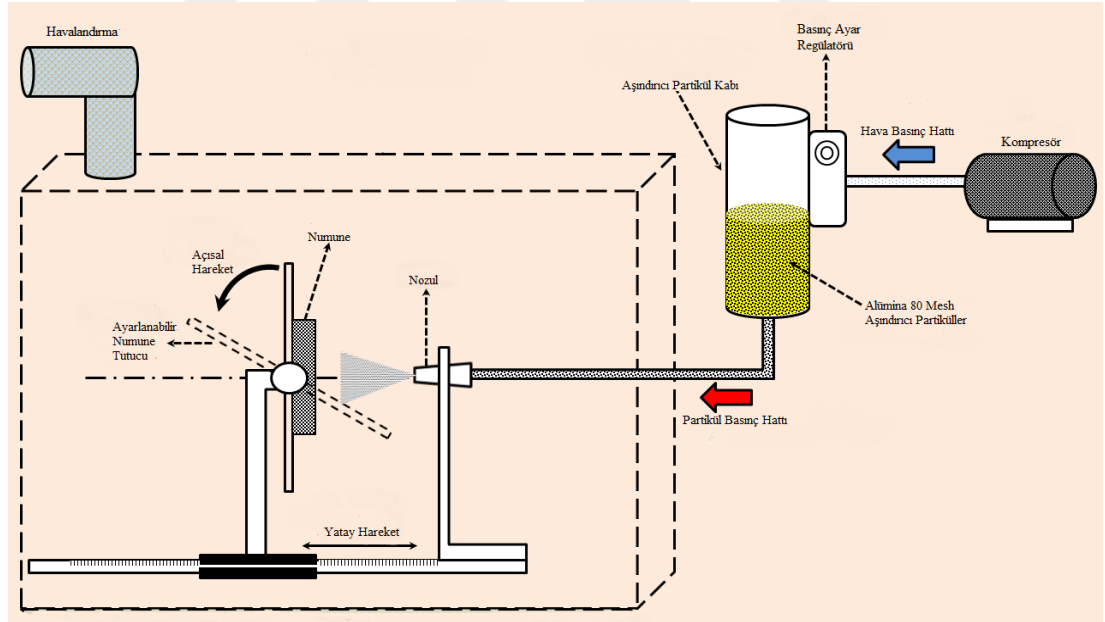
$$V = \frac{L}{t} \quad (4.2)$$

Alt ve üst disk arasındaki uzaklık 20mm olarak ayarlanmıştır. Partikülün bu mesafeyi kat ettiği süre bilindiğine göre partikülün hızı bulunabilir. Bu çalışmada 1,5 bar püskürtme basıncı için partikül hızı 63,492 m/s olarak 3 bar püskürtme basıncı için partikül hızı 78,125 m/s olarak ölçülmüştür [10].

4.3.9. Aşınma deneylerinin yapılması

Aşınma deneylerinde kullanılan erozif aşınma test düzeneği değişen parametreleri uygulayabilmek için özel olarak imal edilmiştir. Test düzeneği yapı elemanları; hava kompresörü, basınç ayar regülatörü, aşındırıcı partikül kabı, borular, püskürtme tabancası, nozul, ayarlanabilir numune tutucu ve dış kabinden oluşmaktadır. Püskürtme tabancasına dışarıdan bir ayak pedalı ile kumanda edilmektedir. İstenilen basıncı ayarlamak için dış kabin üzerinde bir basınç regülatörü mevcuttur.

Açıyla ilgili yapılacak çalışmalar içinse numunenin konulduğu açısı ayarlanabilir tutucu kullanılmıştır. Nozul ve numune arasındaki mesafe tutucunun yatay ekseninde yaptığı hareketle sağlanır.



Şekil 4.7. Katı partikül erozyonu test düzeneği [21]

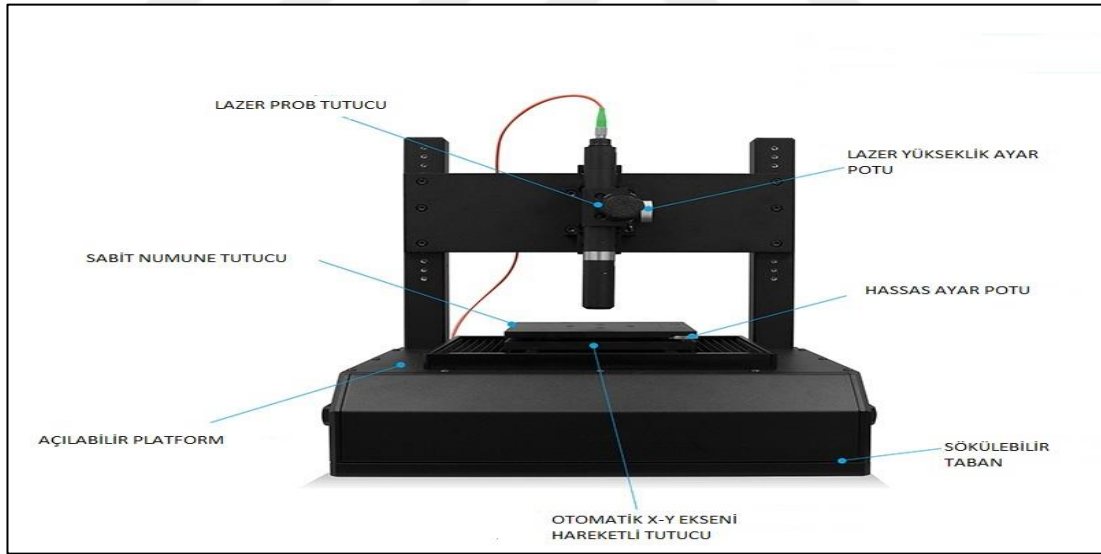
Aşınma deneyleri sırasında katı partikül erozyonuna etki eden ve test düzeneğinde uygulanan parametreler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Eroziyon aşınma deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı türü	Alümina
Aşındırıcı Partikül Boyutları	80 mesh (150-212 mikron)
Partikül çarpma açısı	75°
Püskürtme basıncı	1,5 bar, 3 bar
Partikül çarpma hızı	30,495m.s ⁻¹ , 33,613m.s ⁻¹
Test sıcaklığı	25 °C
Nozul çapı	5 mm
Nozul uzunluğu	50 mm
Nozul – numune arası mesafe	20 mm

4.3.10. Profilometre ile yüzey analizinin yapılması

Aşınma deneylerinde farklı parametrelerle aşındırılan numunelerin yüzey morfolojilerini incelemek ve deneyler sonundaki değişimi gözlemlemek amacıyla profilometre cihazı ile yüzey analizi yapılmıştır. Bu tez çalışmasında bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapılan numuneler ve bu işlemten sonra aşınma testi yapılan numunelerin tamamı profilometre cihazı ile incelenmiştir. Profilometre cihazı ile yapılan ölçümlerde elde edilen 3 boyutlu grafikler hasar analizinin yapılmasını kolaylaştırmıştır.



Şekil 4.8. Nanovea PS50 optik profilometre cihazı

Tablo 4.5. Profilometre cihaz özellikleri

Tip	Masaüstü
X-Yekseni hareketi	50x50 mm otomatik
Z eksen hareketi	30 mm el ile
Maksimum X-Y eksen hızı	20mm/s
Boyutlar	38x33x43
Ağırlık	8 kg

4.3.11. Erozyon oranı hesaplaması

Erozyon aşınma oranı hesaplaması yüzey sertleştirilmesi yapılan numunelerin hangi parametreye ile daha dayanıklı hale gelip gelmediğinin değerlendirilmesi için gereklidir. Erozyon oranı hesaplaması yapılırken belli bir birim aşındırıcının malzeme üzerinde oluşturduğu kütle kaybı esas alınır.

Aynı ortamdaki iki numune aynı parametrelerle aşınmaya uğradığında numunelere temas eden partiküllerin toplam kütlesi birbirinden farklı olacağından bu iki numune arasında karşılaştırma yapıldığında elde edilen veriler doğru olmayacaktır. Erozyon aşınma oranı kütle kaybının (Δm) aşındırıcı partikül kütlesine bölünmesiyle hesaplanır.

$$E = \frac{\Delta m_s}{m_e} \quad (4.3)$$

E = Erozyon oranı

Δm_s = Numune kütle kaybı

m_e = Aşındırıcı partikül kütlesi

4.3.12. Fiziksel ve kimyasal özellikleri SAE

Tablo 4.6. Çelik bilye özellikleri [2]








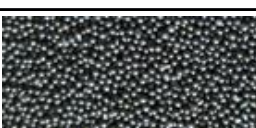



KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	Karbon	Manganez	Silisyum	Sülfür	Fosfor
	0,85-1,20 %	0,60-1,20 %	0,40 % min	0,05 % mak	0,05 % mak
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	Micro yapısı	Sertlik	Yoğunluk		
	Temperlenmiş martenzit	40-52 HRC	7,2gr/m ³ min		

Bu bilyeler genellikle, hassas rulmanlarda ve pek çok endüstriyel alanda kullanılır.

Bu tip maddelerden yapılan bilyeler, harika yüzey işlevi, önemli ölçüde sertlik, yüksek taşıma kapasitesi ve aynı zamanda çok iyi aşınma veya bozulma direnci gösterirler.

Maksimum mekanik güce ulaşmak için, krom çelik bilyeler tamamen sertleştirilmiştir.

Çelik Bilye Çesitleri

SAE NO.	Ürün Resmi	Nominal Çap - (mm)	SEA J444 ELEK ANALİZİ	
			ELEK (mm)	Tolerans
S-780		2.00	2.80 7 Nolu Elekten 2.00 10 Nolu Elekten 1.70 12 Nolu Elekten	Tamamı min. %85 min. %97
S-660		1.68	2.36 8 Nolu Elekten 1.70 12 Nolu Elekten 1.40 14 Nolu Elekten	Tamamı min. %85 min. %97
S-550		1.41	2.00 8 Nolu Elekten 1.40 14 Nolu Elekten 1.18 16 Nolu Elekten	Tamamı min. %85 min. %97
S-460		1.19	2.00 10 Nolu Elekten 1.70 12 Nolu Elekten 1.18 16 Nolu Elekten 1.00 20 Nolu Elekten	Tamamı max. %5 min %85 min. %96
S-390		1.00	1.70 12 Nolu Elekten 1.40 14 Nolu Elekten 1.00 18 Nolu Elekten 0.85 20 Nolu Elekten	Tamamı max. %5 min. %85 min. %96
S-330		0.84	1.40 14 Nolu Elekten 1.18 16 Nolu Elekten 0.85 20 Nolu Elekten 0.71 25 Nolu Elekten	Tamamı max. %5 min. %85 min. %96
S-280		0.71	1.18 16 Nolu Elekten 1.00 18 Nolu Elekten 0.71 25 Nolu Elekten 0.60 30 Nolu Elekten	Tamamı max. %5 min. %85 min. %96
S-230		0.60	1.00 18 Nolu Elekten 0.85 20 Nolu Elekten 0.60 30 Nolu Elekten 0.50 35 Nolu Elekten	Tamamı max. %10 min %85 min. %97
S-170		0.42	0.85 20 Nolu Elekten 0.71 25 Nolu Elekten 0.43 40 Nolu Elekten 0.36 45 Nolu Elekten	Tamamı max. %10 min. %85 min. %97
S-110		0.30	0.60 30 Nolu Elekten 0.50 35 Nolu Elekten 0.30 50 Nolu Elekten 0.18 80 Nolu Elekten	Tamamı max. %10 min %80 min. %90
S-70		0.20	0.43 40 Nolu Elekten 0.36 45 Nolu Elekten 1.18 80 Nolu Elekten 1.13 120 Nolu Elekten	Tamamı max. %10 min %80 min. %90

Şekil 4.9. Çelik bilye görüntüleri [22]

4.3.13. Çelik bilye kullanım alanları

Tablo 4.7. Çelik bilyelerin uygulama alanlarına göre çeşitleri

ÇELİK BİLYELERİN UYGULAMA ALANLARI	S 780	S 660	S 550	S 460	S 390	S 330	S 280	S 230	S 170	S 110	S 70
Çelik, pik döküm büyük parça temizliği	x	x									
Çelik, pik sfero döküm orta parça temizliği		x	x	x	x	x					
Demir dışı döküm parça temizliği							x	x	x	x	x
Eİ aletlerinde kaplama öncesi temizlik							x	x	x		
Fitting imalatında, galvaniz öncesi temizlik					x	x	x				
Gemi inşaat sanayinde, kazan imalatında			x	x	x	x					
Kalite çelik imalatında, çubuk parça temizliği boru imalatında				x	x	x					
Konteyner imalatında							x	x	x		
Radyatör, kuvvet döküm parçalarda boya ve emaye öncesi temizlik		x	x	x	x						
Tüp imalatında galvaniz öncesi temizlik veya yenilenmesinde		x	x	x	x	x	x				
Yay imalatında yay ömrü arttırma				x	x	x	x				

5. ZIMPARALAMA VE PARLATMA

Kalıplanmış numunelerin (az sayıdaki durumda ise, çıplak bazı numunelerin) mikroskopik incelemeye uygun hale getirilmesi için parlatılması gerekir. Parlatma işleminin temel amacı, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak suretiyle, ışığı iyi yansıtan bir yüzey elde etmektir. Zira metal mikroskopları numune yüzeyinden yansıyan ışınları incelemektedir. Parlatmakla, aynı zamanda daha önceki işlemler sırasında yüzey bölgesinde oluşan deformasyonun derece azaltılması hedeflenmektedir. Bu bakımdan, parlatma işleminin her adımında daha ince aşındırıcılar kullanılmakta, bamsa kuvveti ve makinanın dönme hızı genellikle adım adım azaltılmaktadır. Öz olarak, her malzemeye uygun aşındırıcı malzemelerin seçimi önem taşır.

Parlatma terimi, daha önce ifade edildiği gibi, zımparalama (grinding) ve parlatma (polishing-polisaj) adımlarını içerir. Bu bakımdan, genel olarak parlatmayı, kaba ve ince zımparalama ve kaba ve son parlatma olarak ayırmak mümkündür. Zımpara aşamasında, çoğunlukla kullanılan aşındırıcılar SiC (ve doğal alumina-korund-, magnetit, kübik bor nitrür) esaslı metal zımpara kağıtlarıdır. Halbuki parlatma işlemi aşındırıcının özel olarak dışarıdan katılması ile (pasta, sprej veya çözelti halinde) malzemeler için farklılık gösteren özel kumaşlar üzerinde gerçekleştirilir. Gerek zımparalama ve gerekse parlatma işlemlerinin el yardımı ile veya otomatik cihazlar yardımı ile yapılır.

Zımpara kağıtları birim alandaki aşındırıcı partikül sayısına göre numaralandırılmıştır. Dolayısıyla, partikül boyutu küçüldükçe birim alandaki partikül sayısı artar ve zımparanın numarası yükselir. Mesela, en kalın partikülleri içeren bir zımparanın numarası 80'dir ve partiküllerin tane boyut aralığı 210-177 mikrondur; halbuki 800 numaralı zımpara ince partiküllerden oluşmuştur (partikül boyut aralığı 15-11 mikron). Yaygın olan bu kullanımın dışında zımparalar farklı şekillerde de gösterilmektedir (Tablo 5.1). Piyasada daha ince taneli zımparalar da mevcuttur; fakat bu boyutlarda zımpara karşılığı olarak elmas veya elmaslı diskler de giderek yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 5.1. Zımparaların gösterimi

Zımpara Tane Numarası	Uzun Yazılış Şekli	Kısaltılmış Şekli	Mikron olarak tane boyutu
80	4	-	210-177
150	3	-	105-88
180	2	-	88-74
240	1	-	53-45
320	0	1/0	37-31
400	00	2/0	31-27
600	000	3/0	22-18
800	0000	4/0	15-11

150 numaralı zımparaya kadar olan zımparalarla yapılan işlem kaba zımparalama, daha ince zımparalarla yapılan işlem ince zımparalama adını alır. Kaba zımparalama, kesilen yüzeylerin ilk düzleme işlemidir ve kesilme sonrası veya kalıplama sonrası da bu işlem yapılmış olabilir; bu takdirde, zımparalama işlemine doğrudan ince zımparalama ile başlanır. İnce zımparalama ise parlatmaya hazırlık işlemidir. Zımparalama esnasında yapılabilecek hataların daha sonraki adımlarda düzeltilmesi imkânı olmadığı için, bu işlem esnasında çok dikkatli çalışılmalıdır.

Otomatik cihazlar dışında, el ile zımparalama yapıldığında, numunenin her bir zımparanın yüzeyine üniform basmasına, yüzeyde sadece o zımparaya ait çiziklerin bulunmasına özen gösterilmelidir. Bu çiziklerin tek bir doğrultuda olmasına, numunenin zımparaya tek yönlü olarak sürülmesine, işlemin akan su altında yapılmasına, zımpara değiştirirken numunenin, ellerin ve zımparanın iyice yıkanarak bir sonraki adıma kaba zımpara tozunun taşınmamasına ve sonraki zımparanın 90° dik doğrultuda uygulamasına dikkat edilmelidir. Bir zımparanın oluşturduğu deformasyon zonunun sonraki ile yapılan işlem süresinde ortadan kaldırıldığı varsayılır. Her zımpara adımı sonunda numune yüzeyinin gözle kontrol edilmesi uygundur. Zımparalama sırasında, numunenin uzun süre ıslak bırakılmasından kaçınılmalıdır.

Zımparalama işlemi parlatma takip eder. Parlatma, zımparalanmış yüzeyin bir döner disk üzerindeki kumaş üzerine uygulanan aşındırıcı partiküller vasıtası ile aşındırılarak yapılır. Sürtünmeyi azaltmak için bir çeşit yağlayıcı da kullanılır.

Aşındırıcı olarak, çoğunlukla Al_2O_3 kullanılmakla beraber elmas, krom oksit, magnezyum oksit, demir oksit de kullanılmaktadır. Yumuşak malzemelerin son parlatmasında koloidal silika da önemli yer tutar. Alumina pasta, solusyon veya toz halinde bulunurken elmas sprej, solusyon veya pasta halinde, diğerleri genellikle pasta şeklinde bulunur. Elmas kullanılması halinde yağ esaslı yağlayıcılar, alumina ve diğer aşındırıcılar kullanılması haline ise su türü yağlayıcılar kullanılır. Aşındırıcıların boyutsal büyüklüğü kaba veya son parlatma adımına göre değişir. Kaba parlatma adımı 1 mikrona kadar olup alumina ve elmas çok kullanılan aşındırıcılardır. Elmas, alumina, koloidal silika, magnezyum oksit, demir oksit, krom oksit ise son parlatma adımında kullanılır.

Aşındırıcılar, genellikle alüminyum veya PVC diskler üzerine yapıştırılmıştır veya tutturulmuştur. Özel parlatma kumaşları üzerine tatbik edilir. Kumaşlar, parlatılacak malzemeye göre çeşitlilik gösterir; bilardo çuhası, ipek, kadife, naylon gibi kumaşlar bu maksatla kullanılmaktadır. Parlatma sırasında numune ile aşındırıcı (kumaş) arasında sürtünmeden ileri gelebilecek ısınmayı engellemek için su, yağ gibi yağlayıcılar kullanılır.

Parlatma işlemi parlatma makinası ile yapılır. Numune bazı makinalarda el ile tutulurken otomatik makinalarda çok sayıda numuneyi birlikte parlatmak mümkündür. Bu durumlarda, numunelerin aynı tür olması gerekir; çünkü parlatma parametreleri malzemeden malzemeye değişmektedir.

Parlatma işlemi tamamlandığında, numunenin yüzeyi ayna gibi parlak olur. Parlatma işlemi sırasında numunenin zaman zaman döndürülmesi, kuyruklanma adı verilen kusurların oluşumuna engel olur. Parlatma işlemi sonunda yüzey deterjanlı su ile yıkanır, alkolle temizlenir ve hava püskürtülerek kurutulur.

Yukarıda anlatılan mekanik parlatma pek çok numunenin parlatılmasında gayet tatminkâr sonuçlar vermektedir. Ancak, özellikle bakır, alüminyum, ostenitik paslanmaz çelik gibi tek fazlı ve yumuşak malzemelerin mekanik olarak parlatılmasında birçok güçlükle karşılaşmaktadır. Bunların başlıcaları çabuk çizilme ve aşırı yük tatbiki nedeniyle belirgin yüzey deformasyonudur. Bu tür malzemelerin parlatılmasında elektrolitik parlatma da kullanılabilir. Özel elektrolitik parlatma cihazlarında belirli akım ve voltajda belirli kimyasal çözeltiler içinde yapılan elektrolitik parlatma işlemi sonucunda son derece düzgün-temiz bir yüzey elde edilir. Farklı

fazların çözümlenmeden farklı miktarlarda etkilenmesi (yüzey reliefine yol açar ve yüksek büyütme oranlarında odak problemi yaratır) ve kalıntıların dökülmesi bu usulün dezavantajıdır.

Sertlikleri farklı olan fazlar içeren alaşımların parlatılması da bazı zorluklar arz eder. Bu tür malzemelerde fazların farklı miktarlarda aşınması yüzeyin ayna gibi olmasına izin vermez; reliefli bir yüzey görüntüsü verir. Bu tür etkilerden kaçınmak için, titreşimli (vibrasyonlu) parlatma sistemleri kullanılmaktadır. Bu tür parlatma oldukça uzun sürelidir (saatler boyu sürebilir). Bunlar nispeten karmaşık cihazlardır ve her laboratuvarında bulunması gerekli değildir.



6. BİLYA PÜSKÜRTME (SHOT PEENING)

Bilya püskürtme 1940'lı yılların sonlarında keşfedilerek, üzerinde yapılan inovatif çalışmalar doğrultusunda günümüzde geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur [1]. Bugün hava ve kara taşıtları ile gönül rahatlığı ve emniyetli bir şekilde seyahat edilebiliyorsa, bunda bilya püskürtmenin payı büyüktür [2]. İnsanlar bile gündelik hayatın yoğun temposunda birçok gerginliğe maruz kalırken, bu araçlarda kullanılan malzemeler üzerinde meydana gelen termal veya mekanik farklı karakterdeki gerilme yığılmalarının ve genliklerinin büyüklüğünü tahmin etmek mümkün değildir. Hava taşıtlarında büyük önem arz eden türbin kanatçıklarının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olarak gerçekleştirilen bilya püskürtme ile yüzey modifikasyonu işlemi Şekil 6.1'de verilmiştir [3].



Şekil 6.1. Türbin kanatçıklarının bilye püskürtme ile yüzey işleme

Bilya püskürtme, çapları 0,25-1 mm arasında değişiklik gösteren bilyaların altlık malzeme yüzeyine belirli bir kinetik enerji ile fırlatıldıktan sonra tane boyutunun ufalayıp, tane sınırı alanlarının genişlemesi ile dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak yüzey enerjisinin artış gösterdiği ve pekleşmenin meydana geldiği soğuk işlem niteliğindeki bir uygulama olarak tanımlanmaktadır [4]. Yüzey ve iç yapı modifikasyonun meydana geldiği bu işlem sırasında kazanılacak özellikler bilya, altlık malzeme ve proses parametrelerindeki değişimlere büyük bağımlılık göstermekte olup, hedeflenen

mekanik özelliklere göre bilya, altlık malzeme ve proses parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir [5].Yorulmaya Karşı Direncin Artırılması Shot Peening, yüksek alternatif strese maruz kalan bileşenlerin yorulma mukavemetini arttırmak için özel olarak tasarlanmış bir işlemdir. Freze, taşlama bükme veya ısı işlem prosedürleri gibi yüzey işleme işlemleri artık çekme geriliminin neden olur. Bu Gerilim Artık Stresi, parçaların düşük kullanım ömrüne yol açar. Shot Peening, Gerilim Artık Stresini, parçaların yaşam döngüsünde ve maksimum yük kapasitelerinde önemli artışlara yol açan Basıncı Kalıcı Strese dönüştürür [6].

Fan ve kompresör diskleri, bıçaklar, rotorlar ve şaftlar gibi yüksek gerilimli ortamlarda çalışan uçak motoru bileşenleri yorulma hatalarına karşı direncini arttırmak için bilye püskürtme ile yüzey işlemine tabi tutulur. Sertleştirme ile ortaya çıkan sıkıştırıcı gerilmeler, imalat işlemi sırasında meydana gelen herhangi bir artık gerilme gerginliğini azaltacak ve çoğunlukla ortadan kaldıracaktır.



Şekil 6.2. Gaz türbinli motor kompresör kısmının bilyeli püskürtme işlemi [2]

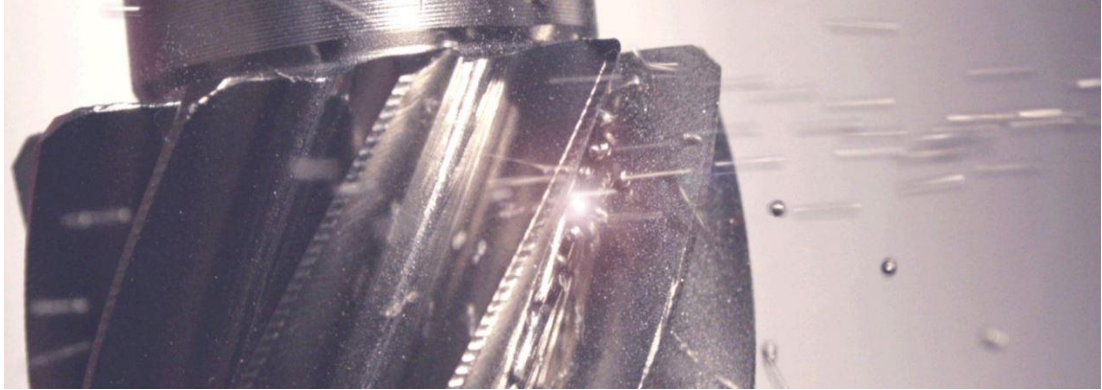
Shot Peening (Bilyalı dövme) mekanizması gereği soğuk işlem prosesidir. Ana amaç yüzeyde gerilim oluşturup mekanik özelliklerin modifiye edilmesidir.

Kullanılan proses piyasadaki kumlamaya oldukça benzemektedir. Fakat Shot peening (Bilyalı dövme) operasyonunda yüzey modifikasyonu söz konusu olduğu için proses parametreleri önem teşkil etmektedir. İstenilen yüzey gerilimine ulaşabilmek için çok fazla parametreyi kontrol altında tutmak gerekecektir. Bundan dolayı kumlama ile karıştırmamak gerekir.

Proses sırasında yüzeyde gerilim oluşturulur. Bu gerilim çatlak oluşumunu önlemeye yardımcı olur dolayısıyla malzemede ömür artışı beklenir. Bombardımana tabi olurken malzemeye çarpan partiküller sadece bir tane değildir, binlerce partikül tüm yüzeyi döver ve yüzey boyunca gerilim tabakası oluşturur. Dolayısıyla yüksek stres altında çalışan parçalarda ters yönlü bir stres oluşturarak malzeme ömrüne direkt olarak etki eder.

Kısaca bahsetmek gerekirse, proses sırasında ana iş parçasından daha sert bir yapıda partiküller (Çelik bilya, Seramik bilya vs.) istenilen basınç akış miktarı , açıda gönderilerek yüzey dövülür. Bu sırada yüzeyde bir gerilim tabakası oluşmaktadır. Kullanılan parametreler shot peening operasyonu yapılan makinanın kabiliyetleriyle doğru orantılıdır. Dolayısıyla iş parçasına, kullanılacak olan partiküle göre makine tasarımları ve ana bileşenleri değişim gösterebilir.

Prosesteki temel parametreler bilye çapı, hızı, kütlesi, dövme açısı ve parça ile bilyenin yapıldığı malzemelerdir. Bilya malzemesi genelde döküm çelik (steel shot) olmakla beraber, cam bilye(Glass bead) ve kesik tel (cut wire) parçacıklarının da kullanıldığı farklı uygulamalar vardır. Uygulamada seçilecek olan partikül istenilen intensity değerine göre belirlenir.



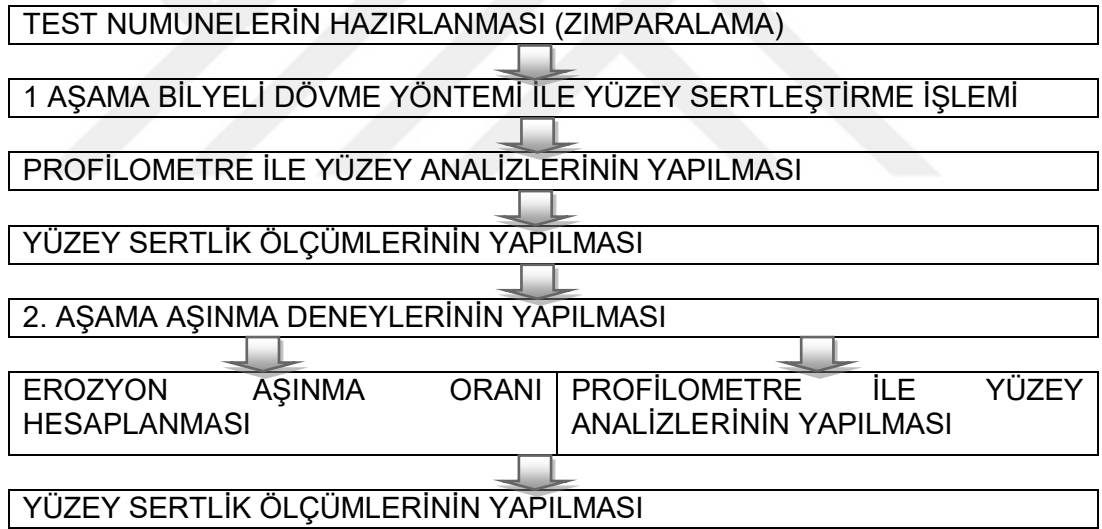
Şekil 6.3. Bilyeli dövme yöntemi

Temel kullanım alanları baskı yayları, krank milleri ve yorulmanın önemli bir problem olduğu yüksek gerilmeye maruz kalan dişlilerin diş dipleridir.

Shot Peening (Bilyalı dövme) bir son yüzey işlemdir, bu işlemde sonra yüzeyde oluşacak olan çarpma, çizik veya talaş kaldırma işlemleri o bölgede oluşan modifikasyonu yok edecektir [23].

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

İnconel 718 nikel alaşımının bilyeli dövme ve erozif aşınma davranışlarının incelenmesinin deneysel çalışmaları Şekil 9.1.' de gösterildiği şekilde tamamlanmıştır. Tez çalışması kapsamında numuneler öncelikle deneylere hazırlanmıştır. Hazırlama işlemi elle ve makine ile zımparalama yapılarak tamamlanmıştır. Deneyin birinci aşaması olarak bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Bu aşamada temassız profilometre ile yüzey analizlerini ve yüzey sertlik ölçümleri yapılmıştır. Deneyin ikinci aşaması olarak katı partikül ile erozif aşınma deneyleri yapılmıştır. İkinci aşamadan sonra aşınma miktarlarının ölçülmesi, profilometre ile yüzey analizlerinin yapılması ve yüzey sertlik ölçümlerinin yapılması işlem basamakları tamamlanmıştır.



Şekil 7.1. Deney akış şeması

7.1. Test Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler inconel 718 20mm çapında 4 mm kalınlığında parçalar halinde Timet Titanyum Metal & Medical firmasından temin edilmiştir. Numuneler sırası ile 80-150-240-400 zımpara kâğıdı ile zımparalanmıştır. Numuneler küçük boyutlarda olduğundan dolayı koli bandı ile tek yüzeyden

bantlanarak düz bütün bir yüzey oluşturulmuştur. Daha sonrasında havalı zımparalama aletine scotch brite takılarak yüzey parlatma işlemleri yapılmıştır.



Şekil 7.2. Numune boyutları

Tablo 7.1. İşlem Yapılan Numunelerin Kodlanması

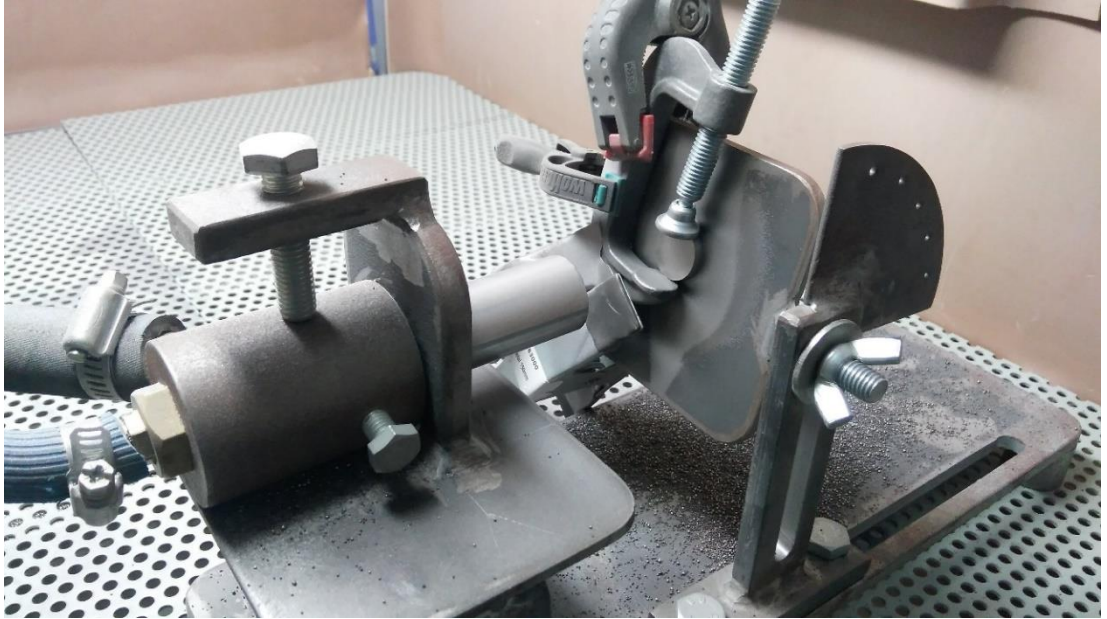
KARISIK ÇELİK BİLYE				KARISIK ÇELİK BİLYE-HAM NUMUNE	
3 BAR-50 MM		1,5 BAR-50 MM		3 BAR-50MM	
0,30 DK	6	0,30 DK	7	2 DK	1
1 DK	5	1 DK	8	3 DK	2
2 DK	3	2 DK	9		
3 DK	4	3 DK	XI		
5 DK	X	5 DK	XII		
10 DK	K3X	10 DK	K1,5X		
SADE ÇELİK BİLYE					
3 BAR-50 MM			1,5 BAR-50 MM		
1 DK	I		1 DK	I	
2 DK	II		2 DK	II	
3 DK	3		3 DK	3	
5 DK	V		5 DK	V	
10 DK	S3X		10 DK	S1,5X	
SADE ÇELİK BİLYE İLE BİLYELİ DÖVME VE AŞINMATESTİNE TABİ					
1,5 BAR 50MM			3 BAR 50MM		
SÜRE	KODU		SÜRE	KODU	
1 DK	S1,5I+		1 DK	S 3I+	
2 DK	S1,5II+		2 DK	S3II+	
3 DK	S1,5III+		3 DK	S3III+	
5 DK	S1,5V+		5 DK	S3V+	
10 DK	S1,5X+		10 DK	S3X+	
KARIŞIK ÇELİK BİLYE İLE BİLYELİ DÖVME VE AŞINMATESTİNE TABİ					
1,5 BAR 50MM			3 BAR 50MM		
SÜRE	KODU		SÜRE	KODU	
1 DK	K 1,5 I+		1 DK	K 3 I+	
2 DK	K 1,5 II+		2 DK	K 3 II+	
3 DK	K 1,5 III+		3 DK	K 3 III+	
5 DK	K 1,5 V+		5 DK	K 3 V+	
10 DK	K 1,5 X+		10 DK	K 3 X+	

Numune boyutlarının küçük olması ve her iki yüzeylerinin de deneysel çalışmalarda kullanılmasından dolayı numuneler kullanıldığı deney aşamasına göre kodlanmıştır. Deneyin her aşamasında numunelerin karıştırılması engellenmiştir. Kodlama işlemi Tablo 7.1'de verilmiştir. Deney karışık çelik bilye ve 80 mesh çelik bilye kullanılarak 1,5 bar ile 3 bar hava basıncı kullanılarak yapılmıştır.

Başlangıçta 30 saniye ile başlanmış olup deneylerin ilerleyen zamanında bu sürenin çok belirgin fark yaratmadığı anlaşıldığından 10 dakika eklenmiştir. Numuneler sıra ile rakam ile numaralandırmaya başlanmış bununda efektif olmadığı anlaşıldığından kodlama yöntemine geçilmiştir.

7.2. Birinci Aşama: Bilyeli Dövme Yöntemi İle Yüzey Sertleştirme İşlemi

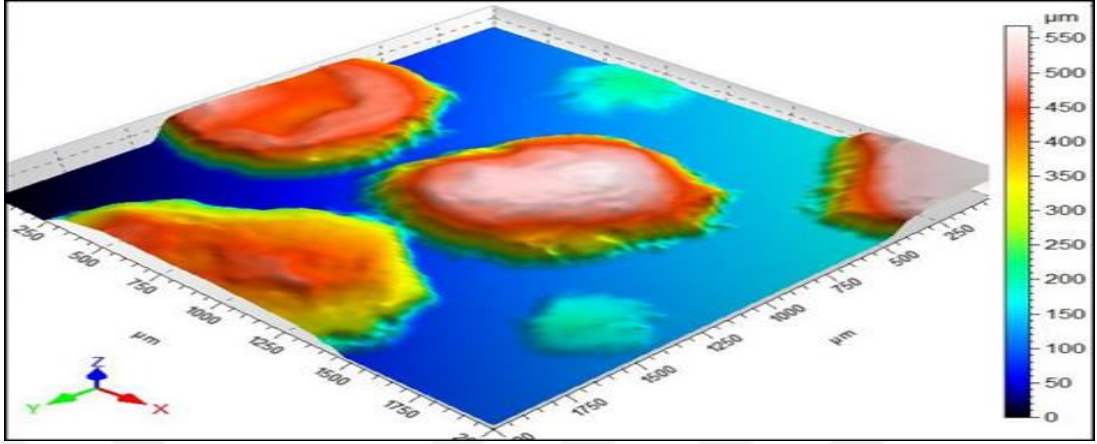
Yüzey parlatma işlemine tabi tutulan numuneler iki farklı basınçla 1,5 bar ve 3 bar olmak üzere iki farklı boyutlarda çelik bilyeler kullanılarak 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika 5 dakika ve 10 dakika olmak üzere beş farklı zamanda bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 7.3. Test standına numunelerin tutturulması

Bilyeli dövme işlemi numune ile nozul arası 90° açılı ve 50mm uzaklık olarak ayarlanmıştır. Numuneler test standına tutturmak için küçük mengene ve kısıkaçlar kullanılmıştır. Bilyeli dövme yöntemi ile yüzey işlemi ve aşınma deneyleri aynı deney

standında farklı zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Deneyin esnasında çelik bilyeler ve aşındırıcı alümina birbirine karışmaması için deneyler sıra ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.4. Bilyeli dövmede kullanılan çelik bilyelerin 3D topografyası

Bilyeli dövme işleminde kullanılan çelik bilyeler, lazer profilometresi kullanılarak taranmış ve yukarıdaki Şekil 7.4'de çelik topların 3 boyutlu yüzeyi verilmiştir. Şekil 7.4'de gösterilen çelik bilyelerin yüzey geometrisi, işlem sırasında Inconel 718 alaşımının yüzey plastik deformasyonunu büyük ölçüde etkiler, dolayısıyla çelik bilyelerin açışallığını ve boyutunu değerlendirmek için 3D topografyası verilmiştir.



Şekil 7.5. Nanovea PS50 temassız 3D optik profilometre seti

Yüzey sertleştirme işleminin ardından Nanovea PS50 marka 3D optik profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Yüzey morfolojilerini incelemek ve deneyler sonundaki değişimi gözlemlemek amacıyla profilometre cihazı ile yüzey

analizi yapılmıştır. Bu tez çalışmasında bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapılan numuneler ve bu işlemden sonra aşınma testi yapılan numunelerin tamamı profilometre cihazı ile incelenmiştir. Profilometre cihazı ile yapılan ölçümlerde elde edilen 3 boyutlu grafikler hasar analizinin yapılmasını kolaylaştırmıştır.

Yüzey sertlik ölçüm işlemleri yapılarak veriler kayıt edilmiştir ve tezin bu aşaması tamamlanmıştır. Yüzey sertlik ölçümleri Vickers Sertlik Deneyi ile yapılmıştır. Bu sertlik ölçümü clemax captiva cihazı ile baskı elemanı olarak tepe açısı 136° olan elmas kare piramit kullanılmıştır. 1 Kg F yükü kullanılmıştır. Mesafe mercekler üzerinde netlik sağlanarak ayarlanmıştır. Ağırlık kolu serbest bırakılarak yükün aşağı inmesi beklendi. Yüklü numune üzerinde kalma süresi yaklaşık 20 saniyedir. Bu süre sonunda baskı ucu numune üzerinden kaldırıldı ve deney bitirildi. Bu işlem her numune için en az üç iz bırakacak şekilde tekrar edildi. Vickers sertlik ölçüm formülü ile numunelerin sertlikleri hesaplandı ve ilgili tabloya işlendi.

7.3. İkinci. Aşama: Aşınma Deneylerinin Yapılması

Deneysel çalışmanın ikinci bölümü olarak bilyeli dövme ile yüzey sertleştirilmesi yapılan numuneler Alümina 80 mesh aşındırıcı ile 3 bar basınç kullanılarak 75° açı ve 20mm uzaklıktan 20 saniye boyunca erozif aşınma işlemine tabi tutuldu. İnkoneel 718 süper alaşımın bilyeli dövme ile yüzey sertleştirilmesinin erozif aşınmaya etkisinin kıyaslanabilmesi için bilyeli dövme ile yüzey sertleştirilmesine tabi tutulmamış numunelerde aynı yöntemle erozif aşınma deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 7.6. Deney esnasındaki güvenlik önlemleri

Deney esnasında oluşan hava sirkülasyonu esnasında bol miktarda çelik bilye, alümina ve inconel 718 tozu oluşmaktadır. Bu tozların solunum yolu veya deri ile vücuda alındığında ciddi sağlık problemleri ile karşılaşılabilir. Sağlık riski ile karşı karşıya kalmamak için deney esnasında eldiven, maske ve gözlük kullanılmıştır. Ayrıca deney esnasında basınçlı hava yüksek frekanslı ses çıkardığı için işitme kaybına sebep olmaması için kulaklık kullanılmıştır.

Bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapılan numuneler ve yüzey sertleştirmesinden sonra erozif aşınmaya tabi tutulan numuneler birinci aşamada olduğu gibi yüzey sertlik ölçümleri Vickers Sertlik Deneyi ile yapılmıştır.

Yüzey sertlik ölçümü iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada numunelerin yüzeyine iz bırakma işlemi yapıldı. İkinci aşamada ise oluşan iz boyutları ölçülerek sertlik hesaplamaları yapıldı.



Şekil 7.7. Yüzey sertlik ölçümü iz oluşturma cihazı

İz bırakma işleminde seçilen ağırlık ve mesafe oluşacak ize etkisi olacağından dolayı uygun parametrelerin seçilmesi doğru ölçüm için önemlidir. Ağırlığın az seçilmesi oluşan izin mercek ile bulunmasını zorlaştırmaktadır. Tam tersine fazla seçilmesi ise numune de derin izler oluşmasına sebep olacaktır. Zwick iz bırakma cihazı ile 1 Kg'lık ağırlık kullanılarak Numune, numune tutucu kısma konulduktan sonra mesafe mercek ile netlik sağlanarak ayarlandı. Ağırlık kolu serbest bırakıldı ve aşağı inmesi beklendi. Bir numune üzerine dağınık şekilde üç iz bırakıldı.

Yüzey sertlik ölçümünün ikinci aşaması ise iz bırakma işleminden sonra oluşan izin boyutlarının ölçülmesidir. İz ölçümü Clemax Captiva cihazı ve yazılımı kullanıldı. Öncelikle numuneler üzerindeki izlerin mercek yardımı ile bulunması ve merkezlenme işlemi yapıldı. Ardından cihaz bünyesinde gömülü bulunan yazılım sayesinde iz ölçümü yapıldı. Küçük ölçekli mercek ile geniş alanda tarama yapıldığını geniş alanda iz yeri belirlendikten sonra daha büyük ölçekli merceğe geçerek izin boyutları tespit

edildi. Görüntü elde edildikten sonra bilgisayarda yüklü program ile izin köşeleri işaretlendi. İşaretlenen iz μm (nanometre) hassasiyetinde ölçüldü. Elde edilen veriler Vickers sertlik formülüne uygulanarak yüzey sertlikleri bulundu ve üç sertlik değerinin aritmetik ortalaması alınarak numune yüzeyinin genel sertlik değeri belirlendi.

Deneyin her aşamasında elde edilen sayısal veriler tablo haline getirildi ve anlamlı bilgiler oluşturuldu.

7.4. Aşınma Testlerinin Sayısal Verileri

Bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapılan numuneler, katı partikül ile aşınma testine tabi tutuldular. Numune sayısının çok olmasının ve boyutlarının da küçük olmasından dolayı kodlama yapıldı. Ağırlıkları elektronik hassas kantar ile ölçüldü. Ham numuneler bilyalı dövme işleminden önce yüzey zımparalama ve parlatma işlemi yapıldı. Ancak bilyalı dövme işleminden sonra ve aşınma testi yapılmadan önce ve sonra yüzey zımparalama ve parlatma işlemi yapılmadı. Aşınma miktarı belirleyebilmek için aşınma testinden önce ve sonra olmak üzere iki sefer ölçüm yapıldı ve iki ölçüm arasındaki fark aşınma miktarı olarak belirlendi. Tablo 7.2'de sade (80 mesh boyutlu) çelik bilye ile ve karışık çelik bilye ile bilye püskürtme yöntemi uygulanan ve iki farklı basınçla yapılan deney verileri verilmektedir.

Tablo 7.2. Aşınma testi sayısal verileri

SADE BILYA 1,5 BAR 50MM				
	KODU	AŞINMA ÖNCESİ	AŞINMA SONRASI	AŞINMA
1 DK	S1,5 I+	10,5306	10,4873	0,0433
2 DK	S1,5 II+	10,7102	10,6432	0,0670
3 DK	S1,5 III+	10,8761	10,8175	0,0586
5 DK	S1,5 V+	10,6843	10,6520	0,0323
10 DK	S1,5 X+	10,6430	10,6102	0,0328

SADE BILYE 3 BAR 50MM				
SÜRE	KODU	AŞINMA ÖNCESİ	AŞINMA SONRASI	AŞINMA
1 DK	S3 I+	10,8938	10,8345	0,0593
2 DK	S3 II+	10,6577	10,5429	0,1148
3 DK	S3 III+	10,5702	10,5163	0,0539
5 DK	S3 V+	10,7616	10,7015	0,0601
10 DK	S3 X+	10,6909	10,6406	0,0503

Tablo 7.2. (Devam) Aşınma testi sayısal verileri

KARIŞIK BILYE 1,5 BAR 50MM				
SÜRE	KODU	AŞINMA ÖNCESİ	AŞINMA SONRASI	AŞINMA
1 DK	K1,5 I+	10,6886	10,6577	0,0309
2 DK	K1,5 II+	10,7857	10,7541	0,0316
3 DK	K1,5 III+	10,6258	10,5860	0,0398
5 DK	K1,5 V+	10,5626	10,5351	0,0275
10 DK	K1,5 X+	10,6139	10,5604	0,0535
KARIŞIK BILYE 3 BAR 50MM				
SÜRE	KODU	AŞINMA ÖNCESİ	AŞINMA SONRASI	AŞINMA
1 DK	K3 I+	10,5830	10,5368	0,0462
2 DK	K3 II+	10,6740	10,6483	0,0257
3 DK	K3 III+	10,9296	10,8768	0,0528
5 DK	K3 V+	10,6247	10,5674	0,0573
10 DK	K3 X+	10,6510	10,6115	0,0395
SHOT PEENING YAPILMAMIŞ 1,5 BAR 50MM				
KODU	AŞINMA ÖNCESİ	AŞINMA SONRASI	AŞINMA	
1.NUMUNE	10,6354	10,5919	0,0435	
2.NUMUNE	10,7818	10,7321	0,0497	
3.NUMUNE	10,5356	10,4847	0,0509	
4.NUMUNE	10,6637	10,6151	0,0486	

7.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri Sayısal Verileri

Bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemleri iki farklı çelik bilye [sade (80mesh) ve karışık boyutlarda], iki farklı basınç(1,5 bar ve 3 bar) kullanılarak, beş farklı zaman (1,2,3,5,10 dakika) boyunca uygulandı. Bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirme yapılan numuneler, temassız lazer profilometre ile yüzey analizleri yapıldı. Yüzey analizleri yapılan numuneler daha sonra erozif aşınma testine tabi tutuldular. Erozif aşınma testinden sonra tekrar yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı. Tablo 9-3 de bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirme işleminden sonra ve aşınma testinden sonra yapılan yüzey analizlerinin sayısal verileri verilmektedir.

Tablo 7.3. Yüzey pürüzlülük ölçümleri sayısal verileri

SADE BILYA 1,5 BAR 50MM								
	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	17,593	18,740	36,333	2,772	4,350	4,876	9,226	1,742
2 DK	28,761	18,587	47,348	3,868	4,041	3,964	8,005	1,576
3 DK	27,808	17,994	45,802	5,144	3,972	4,122	8,095	1,517
5 DK	18,876	13,912	32,788	2,358	4,249	4,294	8,543	1,644
10 DK	30,914	74,428	105,342	5,572	5,451	6,641	12,092	2,204
SADE BILYE 3 BAR 50MM								
	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	25,894	18,295	44,188	3,505	4,491	4,559	9,050	1,564
2 DK	19,108	16,942	36,050	2,820	4,514	4,292	8,805	1,654
3 DK	15,562	17,350	32,913	2,525	4,567	4,817	9,384	1,632
5 DK	28,665	25,094	53,758	4,903	5,925	5,139	11,064	1,944
10 DK	34,805	22,900	57,705	3,877	5,940	5,608	11,547	2,044
SADE BILYE 1,5 BAR 50MM önce								
	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	20,932	23,953	44,885	3,355	5,736	5,646	11,382	1,978
2 DK	25,048	24,443	49,490	4,227	6,491	5,282	11,772	2,200
3 DK	22,500	23,078	45,578	3,146	5,250	4,697	9,947	2,200
5 DK	19,772	18,040	37,812	2,856	4,967	5,086	10,053	1,780
10 DK	47,084	20,911	67,994	3,644	6,437	5,165	11,602	2,172
SADE BILYE 3 BAR 50MM önce								
	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	17,059	20,948	38,007	3,008	5,764	5,489	11,252	1,954
2 DK	23,981	37,383	61,364	5,054	5,943	4,961	10,903	1,887
3 DK	19,527	27,933	47,460	3,118	5,346	4,741	10,087	1,919
5 DK	23,692	35,818	59,510	4,263	6,141	5,351	11,492	2,153
10 DK	38,035	23,163	61,198	4,392	5,101	4,925	10,026	1,798
SADE BILYE 1,5 BAR 50MM sonra								
	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	42,823	32,271	75,094	9,384	6,692	6,320	13,011	2,353
2 DK	72,826	44,414	117,240	16,605	4,616	5,608	10,224	1,879
3 DK	53,139	44,630	97,768	12,437	4,878	4,670	9,548	1,821

Tablo 7.3. (Devam) Yüzey pürüzlülük ölçümleri sayısal verileri

5 DK	33,229	28,768	61,997	6,982	5,159	5,904	11,063	1,858
10 DK	47,782	33,972	81,754	8,503	5,329	5,345	10,675	1,978
SADE BILYE 3 BAR 50MM sonra								
	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	58,311	42,699	101,010	12,402	5,737	6,481	12,219	2,227
2 DK	109,914	61,184	171,098	23,262	5,838	5,684	11,522	2,010
3 DK	45,253	41,029	86,283	12,177	5,512	5,703	11,215	2,127
5 DK	59,144	68,011	127,155	11,631	5,420	6,709	12,129	2,000
10 DK	75,747	48,121	123,868	14,027	6,540	7,011	13,552	2,470
KARIŞIK BILYE 1,5 BAR 50MM								
SÜRE	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	29,391	22,137	51,527	5,091	8,419	7,352	15,771	2,999
2 DK	24,286	19,412	43,698	3,713	6,833	5,492	12,326	2,259
3 DK	24,286	19,412	43,698	3,713	6,833	5,492	12,326	2,259
5 DK	149,682	20,919	170,601	4,051	8,716	7,358	16,074	3,096
10 DK	30,568	29,797	60,365	5,192	10,625	10,119	20,744	4,028
KARIŞIK BILYE 3 BAR 50MM								
SÜRE	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	108,940	24,154	133,095	4,627	9,498	8,772	18,270	3,521
2 DK	30,788	24,247	55,034	4,370	8,904	7,526	16,430	3,256
3 DK	27,648	32,400	60,049	4,794	9,258	8,321	17,579	3,331
5 DK	39,311	37,598	76,910	5,867	11,683	10,408	22,091	4,135
10 DK	32,093	37,256	69,349	4,991	9,702	9,183	18,885	3,507
KARIŞIK BILYE 1,5 BAR 50MM önce								
SÜRE	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	26,695	21,431	48,126	4,209	8,502	7,253	15,755	3,004
2 DK	35,674	26,896	62,570	4,743	9,494	7,709	17,203	3,247
3 DK	39,636	42,038	81,675	7,137	12,510	12,363	24,873	4,704
5 DK	38,820	34,264	73,083	5,624	9,052	10,050	19,103	3,667
10 DK	148,460	35,590	184,050	4,893	10,178	7,454	17,632	3,091

Tablo 7.3. (Devam) Yüzey pürüzlülük ölçümleri sayısal verileri

KARIŞIK BILYE 3 BAR								
SÜRE	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	38,444	53,391	91,835	6,195	11,377	12,625	24,002	4,549
2 DK	37,048	37,358	74,406	6,257	12,776	13,971	26,747	4,902
3 DK	30,035	28,336	58,371	4,968	9,973	9,544	19,517	3,704
5 DK	36,583	39,291	75,874	6,151	10,919	10,671	21,590	4,146
10 DK	33,562	30,310	63,872	5,938	8,257	8,550	16,807	3,160
KARIŞIK BILYE 1,5 BAR 50MM sonra								
SÜRE	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	36,642	32,446	69,088	7,762	4,788	5,399	10,187	1,851
2 DK	45,597	34,565	80,163	8,544	5,957	6,695	12,653	2,328
3 DK	83,554	41,609	125,163	12,057	5,680	6,704	12,384	2,233
5 DK	48,808	29,358	78,166	7,993	5,886	5,424	11,311	1,983
10 DK	45,882	37,842	83,724	10,210	6,510	5,778	12,287	2,454
KARIŞIK BILYE 3 BAR 50MM sonra								
SÜRE	Sp	Sv	Sz	Sa	Rp	Rv	Rz	Ra
1 DK	50,073	38,571	88,644	10,147	7,049	6,728	13,777	2,193
2 DK	26,642	27,158	53,800	6,020	5,364	5,481	10,845	1,946
3 DK	52,169	39,955	92,124	11,672	5,928	4,916	10,844	1,832
5 DK	66,978	51,596	118,574	14,938	6,165	6,820	12,985	2,321
10 DK	53,071	43,487	96,559	12,757	6,078	6,021	12,099	2,214

7.6. Yüzey Sertlik Ölçümlerinin Sayısal Verileri

Bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemleri iki farklı çelik bilye [sade (80mesh) ve karışık boyutlarda], iki farklı basınç(1,5 bar ve 3 bar) kullanılarak, beş farklı zaman (1,2,3,5,10 dakika) boyunca uygulandı. Bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirme yapılan numuneler, yüzey sertlik ölçümleri yapıldı. Yüzey sertlik ölçümleri yapılan numuneler daha sonra erozif aşınma testine tabi tutuldular. Erozif aşınma testinden sonra tekrar yüzey sertlik ölçümleri. Tablo 7.4. de bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirme işleminden sonra ve aşınma testinden sonra yapılan yüzey sertlik ölçümleri sayısal verileri verilmektedir.

Tablo 7.4. Yüzey sertlik ölçümleri sayısal verileri

	d1	d2	d	HV	ORTLAMA HV
SADE 1,5 bar 1 dk aşınma ÖNCESİ	0,06	0,05881	0,059405	525,4814846	510,2006171
	0,06072	0,06405	0,062385	476,4782267	
	0,05775	0,05702	0,057385	563,1273837	
	0,06321	0,06166	0,062435	475,7153734	
SADE 1,5 bar 2 dk aşınma ÖNCESİ	0,04083	0,03998	0,040405	1135,881945	1192,180576
	0,0399	0,03966	0,03978	1171,854956	
	0,0378	0,03866	0,03823	1268,804828	
SADE 1,5 bar 3 dk aşınma ÖNCESİ	0,06204	0,05729	0,059665	520,91172	510,9886956
	0,05918	0,0603	0,05974	519,6045939	
	0,06162	0,06111	0,061365	492,4497729	
SADE 1,5 bar 5 dk aşınma ÖNCESİ	0,05862	0,05825	0,058435	543,0718876	513,022825
	0,06498	0,05684	0,06091	499,8344891	
	0,06009	0,06218	0,061135	496,1620983	
SADE 1,5 bar 10 dk aşınma ÖNCESİ	0,05976	0,05999	0,059875	517,2641333	496,9380236
	0,05994	0,06192	0,06093	499,5064061	
	0,06076	0,06433	0,062545	474,0435316	
SADE 3 bar 1 dk aşınma ÖNCESİ	0,04015	0,04274	0,041445	1079,59069	1128,760633
	0,04267	0,04324	0,042955	1005,022933	
	0,04021	0,04033	0,04027	1143,510507	
	0,0381	0,03782	0,03796	1286,918402	
SADE 3 bar 2 dk aşınma ÖNCESİ	0,03845	0,03944	0,038945	1222,643947	1219,66172
	0,03651	0,03704	0,036775	1371,191321	
	0,04107	0,04238	0,041725	1065,149893	
SADE 3 bar 3 dk aşınma ÖNCESİ	0,0415	0,04197	0,041735	1064,639519	1198,974923
	0,0395	0,03792	0,03871	1237,533819	
	0,03753	0,03816	0,037845	1294,75143	
SADE 3 bar 5 dk aşınma ÖNCESİ	0,03694	0,03827	0,037605	1311,330712	1179,6307
	0,03832	0,03883	0,038575	1246,21091	
	0,04311	0,04383	0,04347	981,3504778	
SADE 3 bar 10 dk aşınma ÖNCESİ	0,0444	0,04519	0,044795	924,1539769	949,0882275
	0,0442	0,04509	0,044645	930,3744259	
	0,04205	0,04439	0,04322	992,7362797	
SADE 1,5 bar 1 dk aşınma SONRASI	0,04266	0,04311	0,042885	1008,306553	618,3177424
	0,05514	0,05617	0,055655	598,6804059	
	0,07006	0,07196	0,07101	367,7599175	
	0,06203	0,05995	0,06099	498,5240929	

Tablo 7.4. (Devam) Yüzey sertlik ölçümleri sayısal verileri

SADE 1,5 bar 2 dk aşınma SONRASI	0,03753	0,03726	0,037395	1326,100209	1283,193761
	0,0425	0,04117	0,041835	1059,555895	
	0,03787	0,03603	0,03695	1358,233798	
	0,03707	0,03601	0,03654	1388,885144	
SADE 1,5 bar 3 dk aşınma SONRASI	0,04146	0,04061	0,041035	1101,271862	1024,143107
	0,04166	0,04036	0,04101	1102,614959	
	0,04772	0,04658	0,04715	834,1420682	
	0,0432	0,04051	0,041855	1058,54354	
SADE 1,5 bar 5 dk aşınma SONRASI	0,04793	0,04805	0,04799	805,1965747	965,9487283
	0,04483	0,04425	0,04454	934,7661845	
	0,04372	0,04408	0,0439	962,2199968	
	0,04023	0,03968	0,039955	1161,612157	
SADE 1,5 bar 10 dk aşınma SONRASI	0,04322	0,04332	0,04327	990,4433222	1051,518939
	0,04194	0,04438	0,04316	995,4983547	
	0,04243	0,03911	0,04077	1115,634653	
	0,04218	0,03977	0,040975	1104,499425	
SADE 3 bar 1 dk aşınma SONRASI	0,03951	0,03994	0,039725	1175,102112	1163,822033
	0,03985	0,03901	0,03943	1192,751206	
	0,04049	0,04076	0,040625	1123,612781	
SADE 3 bar 2 dk aşınma SONRASI	0,04098	0,04117	0,041075	1099,128007	1163,617939
	0,04027	0,03983	0,04005	1156,107924	
	0,03912	0,03836	0,03874	1235,617885	
SADE 3 bar 3 dk aşınma SONRASI	0,04115	0,04012	0,040635	1123,059822	1092,745274
	0,04295	0,04129	0,04212	1045,265686	
	0,04109	0,04066	0,040875	1109,910314	
SADE 3 bar 5 dk aşınma SONRASI	0,04038	0,03909	0,039735	1174,510717	1242,562951
	0,03837	0,03828	0,038325	1262,522398	
	0,03771	0,0381	0,037905	1290,655738	
SADE 3 bar 10 dk aşınma SONRASI	0,03982	0,04017	0,039995	1159,289804	1187,612528
	0,0378	0,03708	0,03744	1322,914384	
	0,04259	0,04026	0,041425	1080,633395	
karışım 1,5 bar 1 dk aşınma ÖNCESİ	0,04058	0,03948	0,04003	1157,263454	1106,986973
	0,04236	0,042	0,04218	1042,294072	
	0,04112	0,04021	0,040665	1121,403392	
karışım 1,5 bar 2 dk aşınma ÖNCESİ	0,0434	0,04335	0,043375	985,6538963	1031,953502
	0,04074	0,04242	0,04158	1072,591741	
	0,04185	0,0427	0,042275	1037,614868	

Tablo 7.4. (Devam) Yüzey sertlik ölçümleri sayısal verileri

karışım 1,5 bar 3 dk aşınma ÖNCESİ	0,04293	0,04226	0,042595	1022,08302	1301,814356
	0,03535	0,03511	0,03523	1494,094724	
	0,03612	0,03695	0,036535	1389,265322	
karışım 1,5 bar 5 dk aşınma ÖNCESİ	0,03695	0,03695	0,03695	1358,233798	1320,966045
	0,0378	0,03628	0,03704	1351,641329	
	0,03872	0,03822	0,03847	1253,023009	
karışım 1,5 bar 10 dk aşınma ÖNCESİ	0,03737	0,03717	0,03727	1335,010351	1337,164751
	0,0378	0,03662	0,03721	1339,31915	
karışım 3 bar 1 dk aşınma ÖNCESİ	0,0603	0,05712	0,05871	537,9962616	642,8714357
	0,04701	0,05075	0,04888	776,1417118	
	0,0558	0,05407	0,054935	614,4763338	
karışım 3 bar 2 dk aşınma ÖNCESİ	0,05774	0,06435	0,061045	497,6261824	488,7136195
	0,06105	0,06435	0,0627	471,7026727	
	0,06147	0,06072	0,061095	496,8120035	
karışım 3 bar 3 dk aşınma ÖNCESİ	0,06096	0,05699	0,058975	533,1722278	552,0023236
	0,05692	0,05739	0,057155	567,6687152	
	0,0586	0,05699	0,057795	555,1660277	
karışım 3 bar 5 dk aşınma ÖNCESİ	0,06254	0,06144	0,06199	482,5698071	490,224704
	0,06529	0,05783	0,06156	489,3349056	
	0,06369	0,05826	0,060975	498,7693993	
karışım 3 bar 10 dk aşınma ÖNCESİ	0,05774	0,05661	0,057175	567,2716399	567,2716399
			0		
			0		
karışım 1,5 bar 1 dk aşınma sonrası	0,04058	0,03948	0,04003	347,1790362	332,0960918
	0,04236	0,042	0,04218	312,6882216	
	0,04112	0,04021	0,040665	336,4210176	
karışım 1,5 bar 2 dk aşınma sonrası	0,0434	0,04335	0,043375	295,6961689	309,5860505
	0,04074	0,04242	0,04158	321,7775224	
	0,04185	0,0427	0,042275	311,2844604	
karışım 1,5 bar 3 dk aşınma sonrası	0,04293	0,04226	0,042595	306,6249061	390,5443067
	0,03535	0,03511	0,03523	448,2284173	
	0,03612	0,03695	0,036535	416,7795966	
karışım 1,5 bar 5 dk aşınma sonrası	0,03695	0,03695	0,03695	407,4701394	396,2898136
	0,0378	0,03628	0,03704	405,4923986	
	0,03872	0,03822	0,03847	375,9069028	
karışım 1,5 bar 10 dk aşınma sonrası	0,03737	0,03717	0,03727	400,5031054	401,1494252
	0,0378	0,03662	0,03721	401,795745	

Tablo 7.4. (Devam) Yüzey sertlik ölçümleri sayısal verileri

karışım 3 bar 1 dk aşınma sonrası	0,0603	0,05712	0,05871	537,9962616	642,8714357
	0,04701	0,05075	0,04888	776,1417118	
	0,0558	0,05407	0,054935	614,4763338	
karışım 3 bar 2 dk aşınma sonrası	0,05774	0,06435	0,061045	497,6261824	488,7136195
	0,06105	0,06435	0,0627	471,7026727	
	0,06147	0,06072	0,061095	496,8120035	
karışım 3 bar 3 dk aşınma sonrası	0,06096	0,05699	0,058975	533,1722278	552,0023236
	0,05692	0,05739	0,057155	567,6687152	
	0,0586	0,05699	0,057795	555,1660277	
karışım 3 bar 5 dk aşınma sonrası	0,06254	0,06144	0,06199	482,5698071	490,224704
	0,06529	0,05783	0,06156	489,3349056	
	0,06369	0,05826	0,060975	498,7693993	
karışım 3 bar 10 dk aşınma sonrası	0,05307	0,05982	0,056445	582,0395066	349,676542
	0,04508	0,05076	0,04792	242,2652111	
	0,04921	0,0503	0,049755	224,7249085	

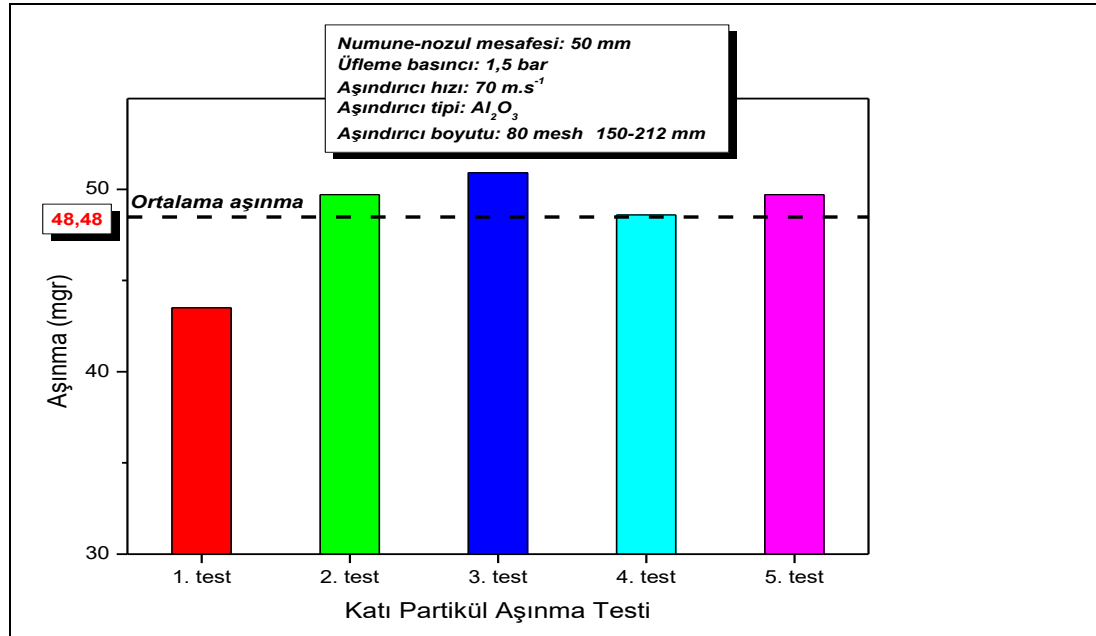
8. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

İki aşamalı olarak tamamlanan deneyler üç farklı değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Bunlar;

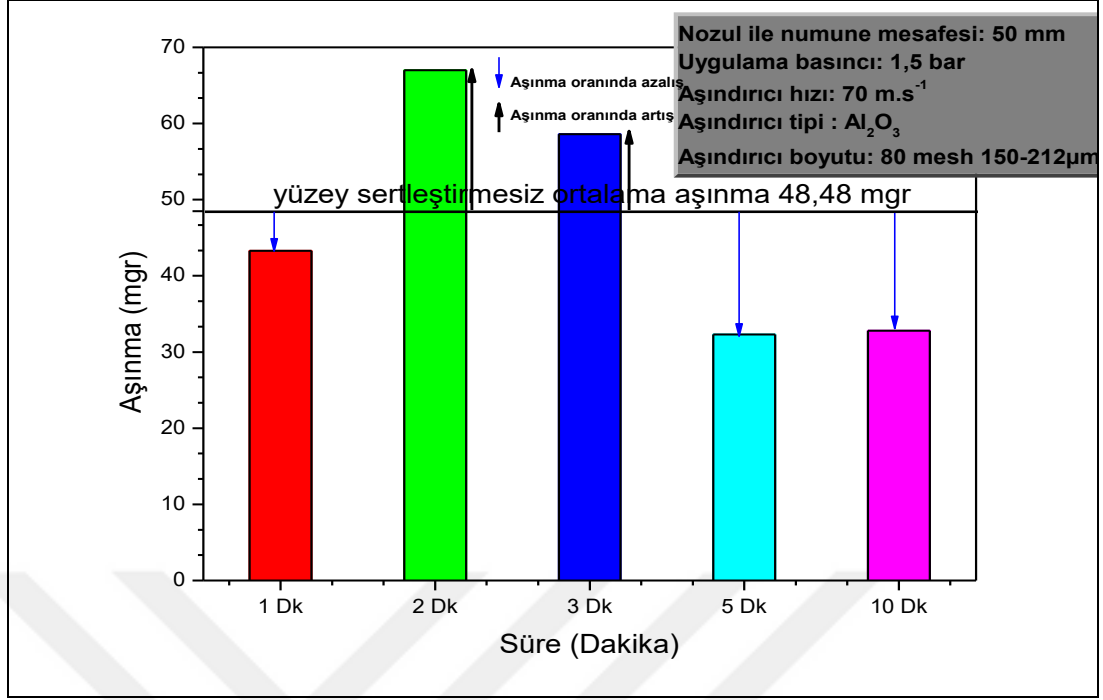
- a) aşınma açısından değerlendirme, bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirilmenin katı partikül ile erozif aşınmaya etkileri,
- b) yüzey sertliğinin bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirme sonrası ve katı partikül ile erozif aşınma sonrası olmak üzere iki aşamanın da değerlendirilmesi ve kıyaslanması,
- c) Yüzey pürüzlülüğünün bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirme sonrası ve katı partikül ile erozif aşınma sonrası olmak üzere iki aşamanın da değerlendirilmesi ve kıyaslanmasıdır.

8.1. Aşınma Deneylerinin Değerlendirilmesi

Aşınmanın sağlıklı değerlendirilebilmesi için numuneler yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulmadan katı partikül aşındırma testine tabi tutuldular.

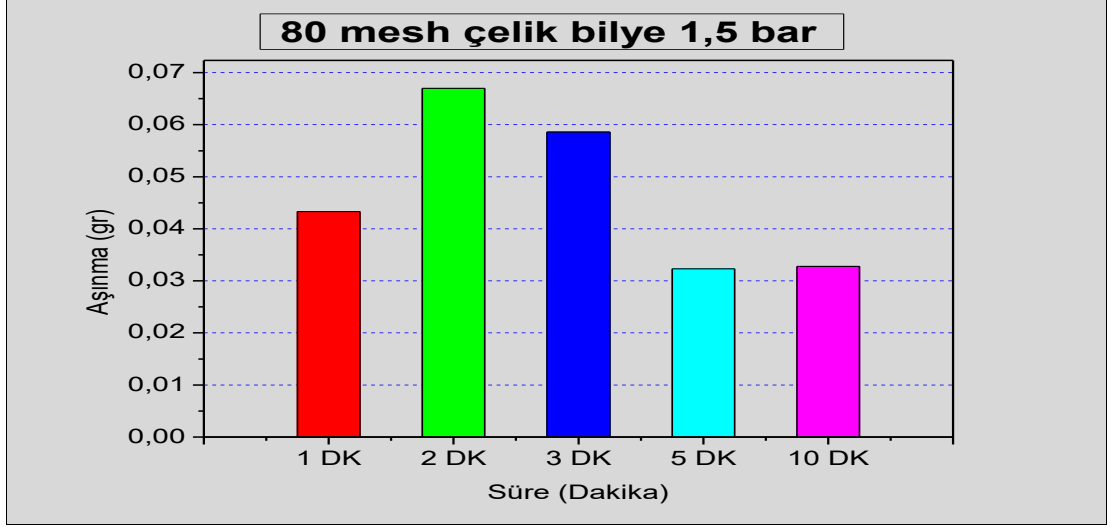


Şekil 8.1. Yüzey sertleştirilmesi yapılmadan aşındırma



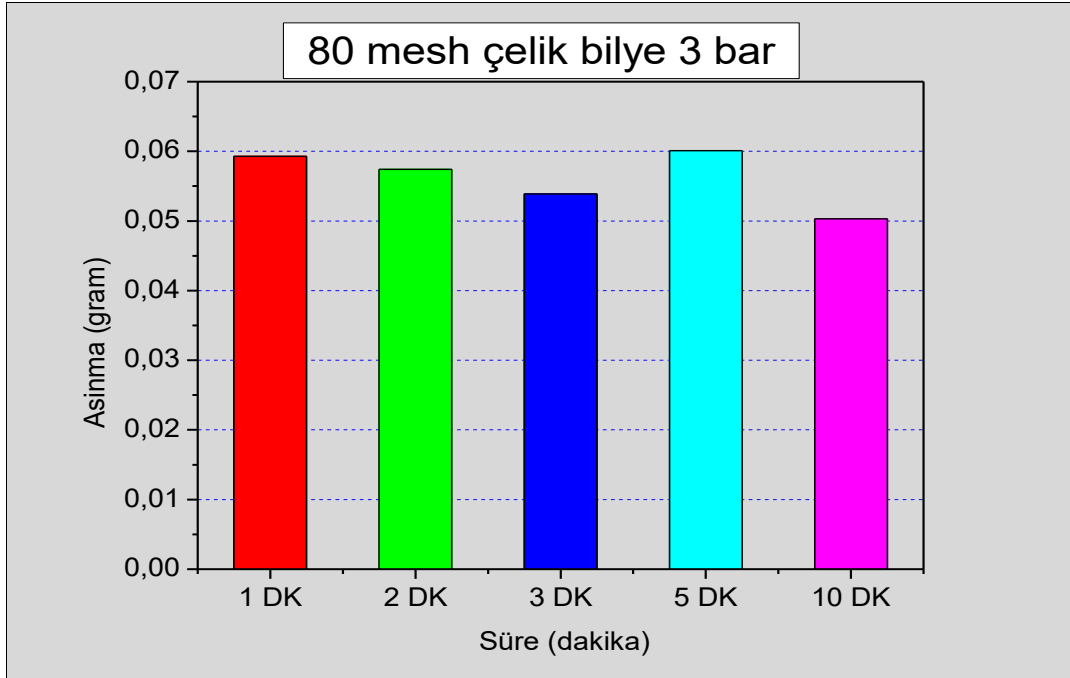
Şekil 8.2. Bilye püskürtme yapılan ve yapılmayan kıyaslanması

Şekil 8.2. shot-peening süresi süresinin, Inconel 718'in kütle kaybı üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Inconel 718'in katı parçacık erozyonu üzerindeki shotpeening etkisini incelemek için, sırasıyla, 60, 120, 180, 300 ve 600 saniyelere ve daha sonra katı parçacık erozyonuna uygulanan testler gerçekleştirildi. Inconel 718, erozyona karşı aşınma için atış-vurma işlemi olmadan test edildi ve kütle kaybı bu durum için 48,48 mgr olarak ölçüldü. Daha sonra, erozyonlu aşınma için test edilmiş numuneler test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, shot-peened örnekleri ile karşılaştırıldığında, shot-peening Inconel 718'in 120 ve 180 saniye boyunca kütle kaybından sonra arttığını göstermektedir. Bu, bileme işlemi sırasında test süresi nedeniyle geçici malzeme kaybına bağlanabilir. 120 ve 180 saniyeden farklı olarak, 60, 300 ve 600 saniye boyunca çekilen numuneler daha iyi bir erozyon direnci ve kütle kaybında azalma olduğunu göstermektedir. İşlemden büyük ölçüde etkilenen 300 ve 600 saniye süren numuneler ve kütle kaybında gözle görülür bir azalma gözlemlendi. Atış vuruş işleminin test süresi, Inconel 718 için 180 saniye gibi kritik bir sürenin üzerinde kütle kaybı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir



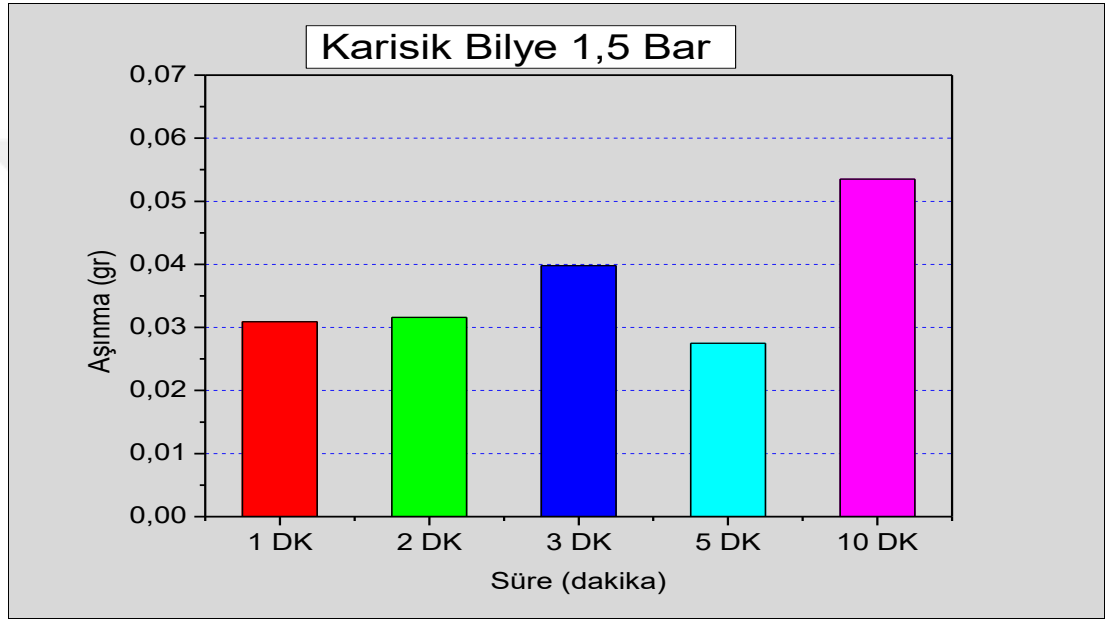
Şekil 8.3. 80 mesh çelik bilye 1,5 bar süre aşınma grafiği

İnconel 718 numuneleri 80 mesh çelik bilye ve 1,5 bar hava basıncı kullanılarak yapılan bilyeli dövme yöntemi (shot peening) ile yüzey sertleştirme işleminden sonra alümina aşındırıcısı ile eroziv aşınma deneyine tabi tutuldular. Deney sonucunda yüzey sertliği ile ters orantılı olarak en az yüzey sertliğine ulaştığımız 2 ve 3 dakikadaki numunelerimiz aşınma deneyinde en fazla aşınan numuneler oldu. En az aşınma ise 5 dakika boyunca yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunede olduğu gözlemlendi.



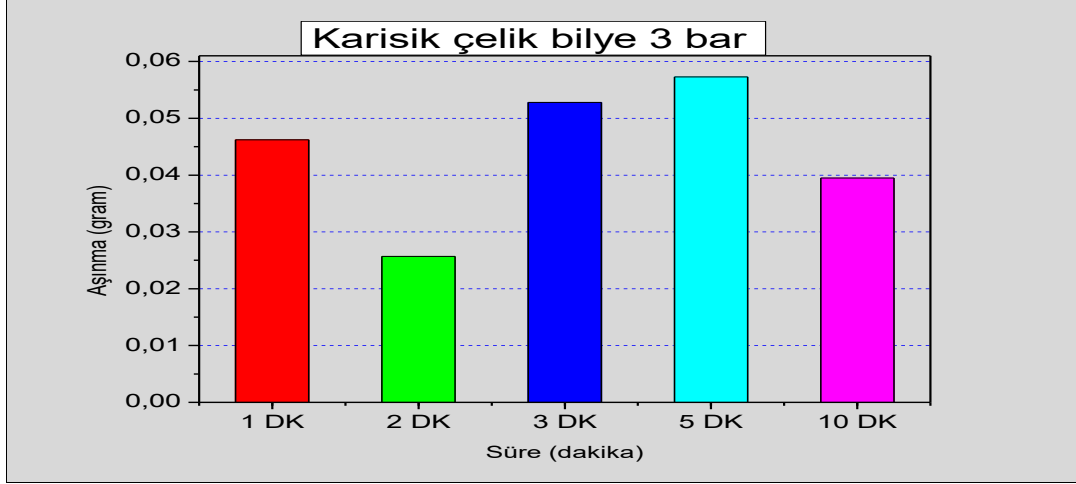
Şekil 8.4. 80 mesh çelik bilye 3 bar süre aşınma grafiği

İnconel 718 numuneleri 80 mesh çelik bilye ve 3 bar hava basıncı kullanılarak yapılan bilyeli dövme yöntemi (shot peening) ile yüzey sertleştirme işleminden sonra alümina aşındırıcısı ile erozif aşınma deneyine tabi tutuldular. Deneyin bu aşamasında ise aşınmanın tüm zamanlarda benzer olduğu gözlemlendi. 5 dakika süre ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunede aşınma en fazla oldu. 10 dakika süre ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunede ise aşınma en az oldu. 1, 2 ve 3 dakika süre ile bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunelerde ise aşınma nispeten süreye bağlı olarak azaldığı gözlemlendi.



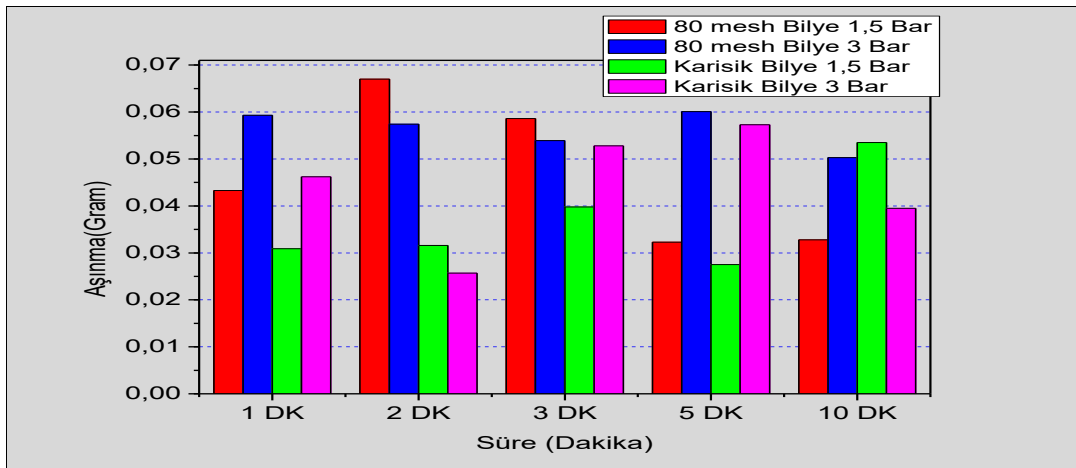
Şekil 8.5. Karışık çelik bilye 1,5 bar süre aşınma grafiği

Deneylerin bu aşamasında ise İnconel 718 numuneleri karışık boyutlardaki çelik bilye ve 1,5 bar hava basıncı kullanılarak bilyeli dövme yöntemi (shot peening) ile yüzey sertleştirme işlemine tabi tutuldular. Aynı numuneler üzerinde profilometre ile yüzey analizleri ve sertlik ölçümleri yapıldıktan sonra alümina aşındırıcısı ile erozif aşınma deneyine de tabi tutuldular. Deneyin bu aşamasında ise aşınmanın zamana bağlı olarak arttığı ancak 5 dakika süre ile yüzey sertleştirmesi yapılan numunede aşınmanın nispeten azaldığı gözlemlendi. 5 dakika süre ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunede aşınma en az oldu. 10 dakika süre ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunede ise aşınma en fazla oldu. 1, 2 ve 3 dakika süre ile bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunelerde ise aşınma nispeten süreye bağlı olarak arttığı gözlemlendi.



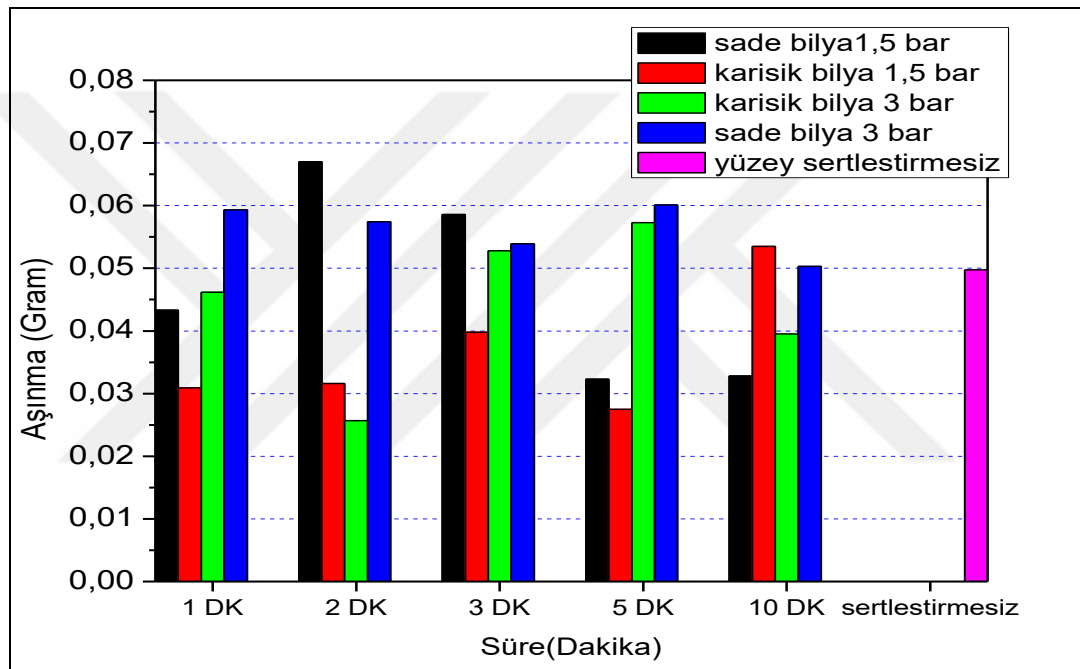
Şekil 8.6. Karışık çelik bilye 1,5 bar süre aşınma grafiği

Deneylerin bu aşamasında ise Inconel 718 numuneleri karışık boyutlardaki çelik bilye ve bir öncekinden farklı olarak 3 bar hava basıncı kullanılarak bilyeli dövme yöntemi (shot peening) ile yüzey sertleştirme işlemine tabi tutuldular. Aynı numuneler üzerinde profilometre ile yüzey analizleri ve sertlik ölçümleri yapıldıktan sonra alümina aşındırıcısı ile erozif aşınma deneyine de tabi tutuldular. Deneyin bu aşamasında ise aşınmanın zamandan bağımsız olarak artıp azaldığı tespit edildi. 5 dakika süre ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunede aşınma en fazla oldu. 2 dakika süre ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunede ise aşınma en az oldu. 3 dakika süre ile bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numune de ise aşınmanın 5 dakika süre ile yüzey sertleştirme yapılan numuneye yakın aşınma gözlemlendi. Aşınma 2 dakikalık numuneden başlayarak, 10 dakikalık, 1 dakikalık, 3 ve 5 olmak üzere sıra ile artışlar gözlemlendi.



Şekil 8.7. 80 mesh ve karışık çelik bilye, 1,5 bar ve 3 bar aşınma grafiği

80 mesh çelik bilye ile 1,5 bar ve 3 bar, karışık çelik bilye ile 1,5 bar ve 3 bar hava basıncı kullanılarak bilyeli dövme yöntemi (shot peening) ile yüzey sertleştirme işlemlerinden sonra ayrı ayrı temassız profilometre ile yüzey analizleri ve sertlik ölçümleri yapıldı. Bu işlemlerden sonra alümina aşındırıcısı ile erozif aşınma deneyine de tabi tutuldular. Tüm deneyin aşınma değerlerini birlikte değerlendirdiğimizde en fazla aşınma; 80 mesh çelik bilye ve 1,5 bar hava basıncı ile 2 dakika süre ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunede gerçekleşti. En az aşınma ise; Karışık çelik bilye ve 3 bar hava basıncı ile 2 dakika süre ile yüzey sertleştirmesine tabi tutulan numunede gerçekleşti.

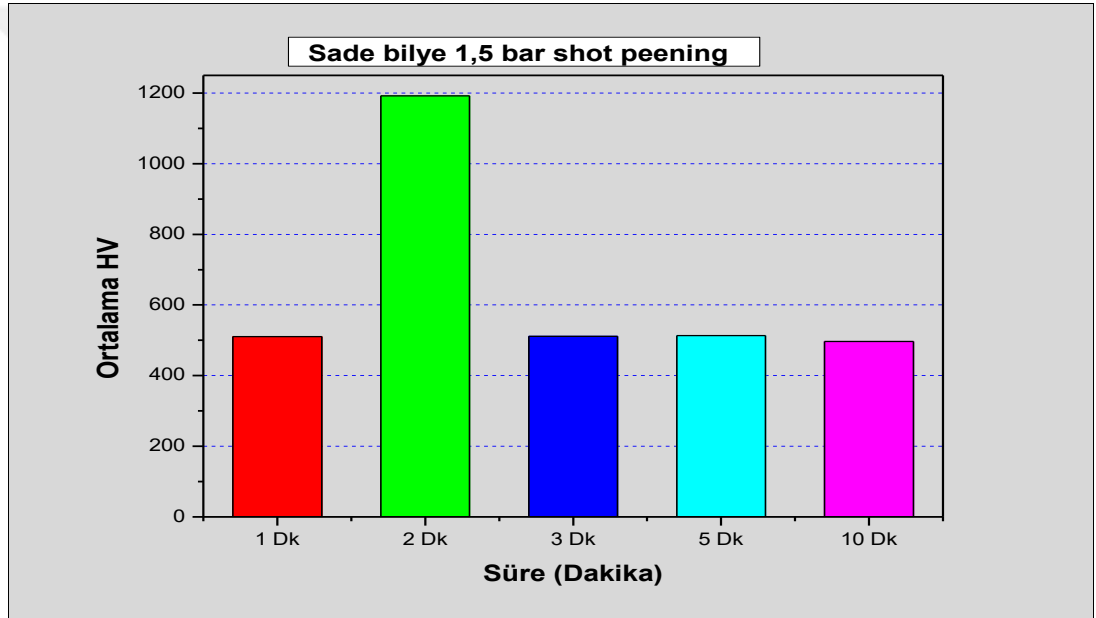


Şekil 8.8. Tüm aşınma değerlerinin grafiği

Bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulan Inconel 718'in aşınma karakterleri incelendiğinde sade (80 mesh) çelik bilye kullanılırsa aşınma açısından 1,5 bar püskürtme basıncı ile beş dakika süresince uygulamanın en ideal parametre olduğu tespit edildi. Şayet karışık boyutlarda çelik bilye kullanılırsa bu sefer 3 bar püskürtme basıncı ile 2 dakika süreli uygulama daha ideal olacaktır. Bilye püskürtme ile yüzey sertleştirme yapılacaksa karışık bilye kullanılması bariz bir şekilde üstünlük sağlamaktadır.

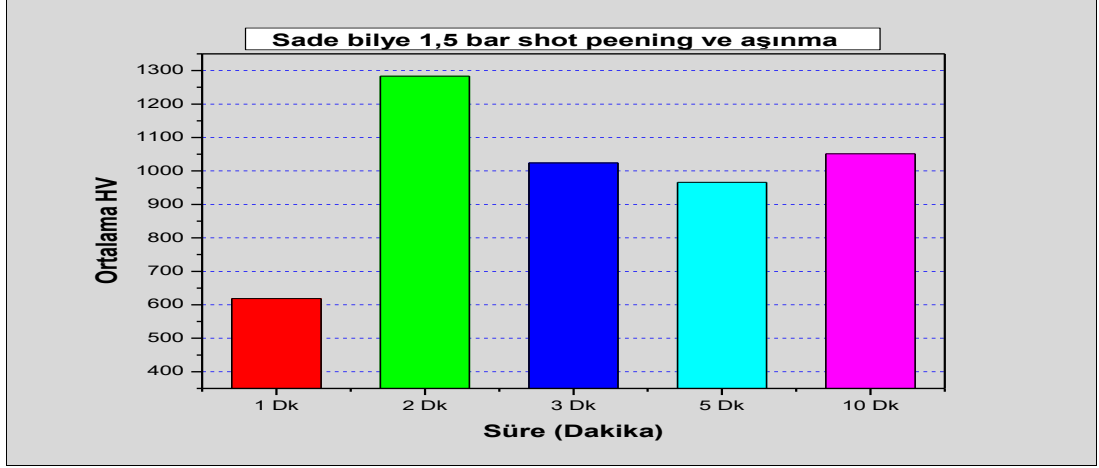
8.2. Yüzey Sertlik Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda grafiklerde belirtilen sonuçlar elde edilmiştir. Bilyeli dövme yöntemi ile yüzey işleme tabi tutulan Inconel 718'in yüzeylerinin sertliğinin kıyaslanabilmesi için yüzey sertlik ölçüm işlemleri yapılmıştır. Numuneler öncelikle sade bilye ile 1,5 bar ve 3 bar basınç ile bilyeli dövme işleme tabi tutulmuştur. Ardından farklı numuneler ise karışık bilye ile bilyeli dövme işleme tabi tutulmuştur. Numunelerin yüzey sertlikleri ölçülmüştür. Bilyeli dövme yönteminin inconel 718 üzerinde aşınmaya olan etkisinin gözlemlenebilmesi için alümina 80 mesh aşındırıcı kullanılarak ile aşınma deneyi uygulanmıştır. Aşınma deneyinden sonra tekrar yüzey sertlik ölçümleri yapılmıştır



Şekil 8.9. Sade bilye 1,5 bar yüzey bilye püskürtme yüzey sertlik grafiği

Sade çelik bilye (80 mesh) ile 1,5 bar püskürtme basıncı ile yüzey sertleştirilmesi 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika olmak üzere beş farklı süre boyunca uygulandı. Bu işlem içerisinde 2 dakika süresince uygulanan bilye püskürtme işleminde maksimum sertlik düzeyine ulaşılmıştır. Diğer dört sürede ise bariz bir fark oluşmamıştır. Bu parametreler ile yapılan yüzey sertleştirme (shot peening) inconel 718 yüzeyinde artı bir katkı sağlayamadı.

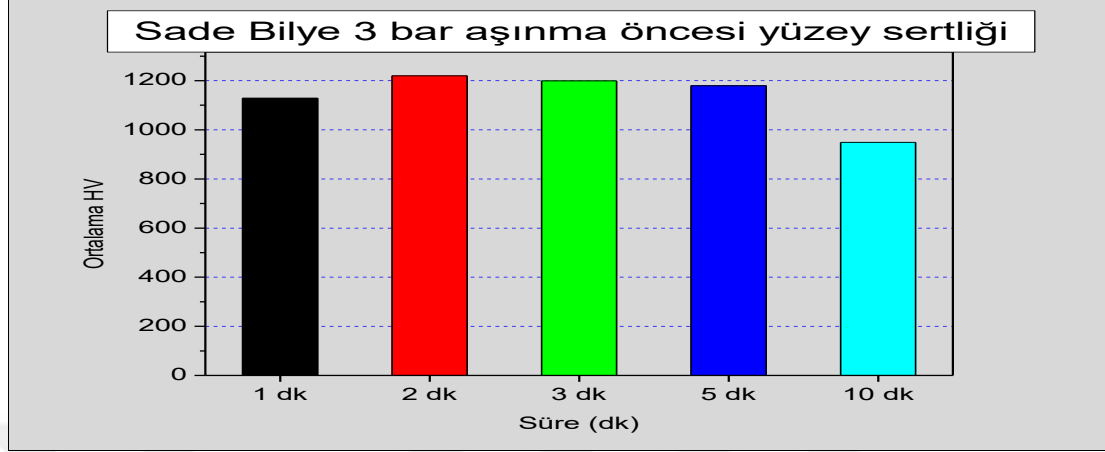


Şekil 8.10. Sade bilye 1,5 bar bilye püskürtme, aşınma yüzey sertlik grafiği

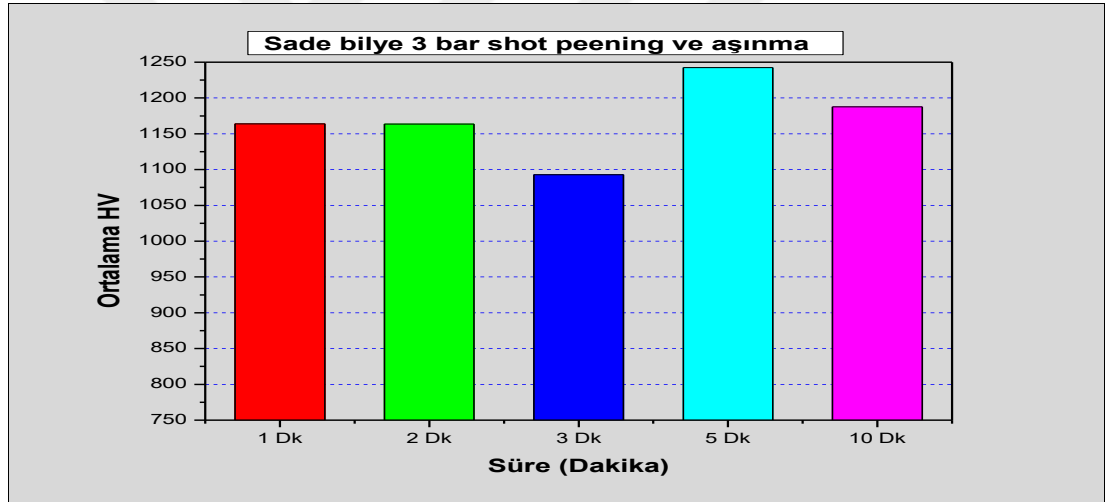
Sade çelik bilye (80 mesh) ile 1,5 bar püskürtme basıncı ile yüzey sertleştirilmesi 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika olmak üzere beş farklı süre boyunca uygulandı. Bu işlem sonrasında aynı numuneler katı partikül ile aşınma testine tabi tutuldu. Bu işlemden sonra ise 2 dakika süresince uygulanan bilye püskürtme işleminde maksimum sertlik düzeyine ulaşılmıştır. Ayrıca aşındırmanın yüzey sertliğine olumlu katkı sağladığı tespit edilmiştir. Bir dakika süresi ile yapılan bilyeli püskürtme ile yüzey sertleştirilmesi ardından yapılan aşınmada da artı bir sertleşme olmuştur. Süre ile ters orantılı olarak üçüncü beşinci dakikalarda yüzey sertliği bir miktar azalmıştır. On dakika süre ile yapılan yüzey sertleştirme işleminde ise en düşük yüzey sertlik değerine ulaşılmıştır. Yüzey sertleştirme deneyinde ilk dakikalarda bilyeli dövme yöntemi yüzey işlenirken düşük dakikalarda tanecikler arasındaki mesafe azalırken sertliğe olumlu katkı sağlamıştır. İkinci dakikada ise azami sertliğe ulaşılmıştır. Deneyin bu aşamasından sonra ise yüzeyde kırılmalar ve aşınmalara bağlı olarak yüzey sertliğinde azalmalar gözlemlenmiştir.

80 mesh çelik bilye kullanılarak 3 bar basınç kullanılarak bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapıldıktan sonra yüzey sertlik ölçümü yapıldı. Ölçüm sonucunda Şekil 8.11'de ayrıntılarının verildiği gibi bir dakika süreyle yapılan bilyeli dövme işlemi yüzey sertliğini artırmıştır. İki dakika süre ile yapılan yüzey sertleştirme işleminde maksimum sertlik oluşmuştur. Süre ile ters orantılı olarak üçüncü beşinci dakikalarda yüzey sertliği bir miktar azalmıştır. On dakika süre ile yapılan yüzey sertleştirme işleminde ise en düşük yüzey sertlik değerine ulaşılmıştır. Yüzey sertleştirme deneyinde ilk dakikalarda bilyeli dövme yöntemi yüzey işlenirken düşük dakikalarda tanecikler arasındaki mesafe azalırken sertliğe olumlu katkı sağlamıştır. İkinci

dakikada ise azami sertliğe ulaşılmıştır. Deneyin bu aşamasından sonra ise yüzeyde kırılmalar ve aşınmalara bağlı olarak yüzey sertliğinde azalmalar gözlemlenmiştir



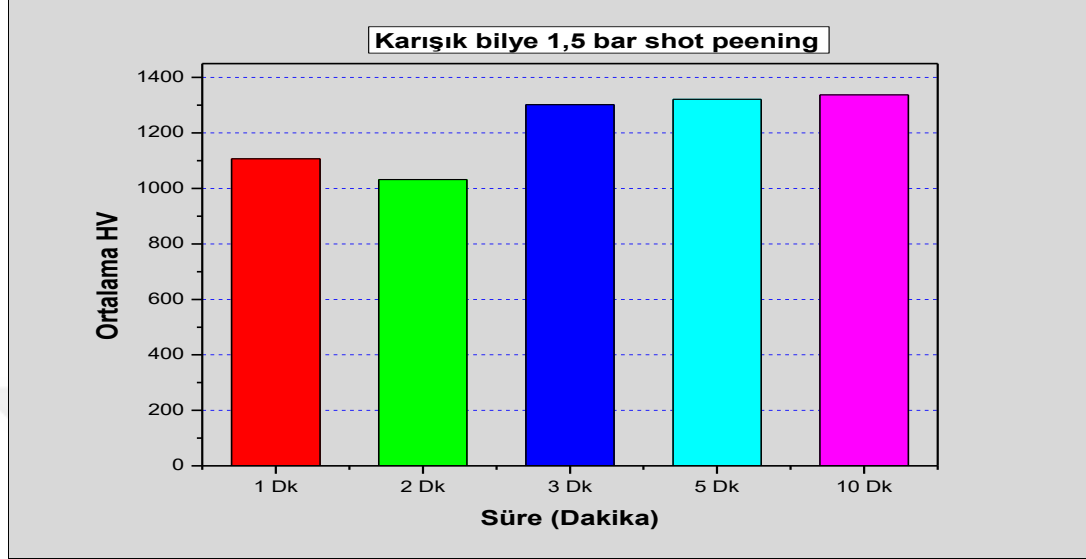
Şekil 8.11. Sade bilye 3 bar bilyeli dövme yüzey sertlik ölçümü



Şekil 8.12. Sade bilye 3 bar bilye püskürtme, aşınma yüzey sertlik grafiği

80 mesh çelik bilye kullanılarak 3 bar basınç kullanılarak bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapıldıktan sonra aynı numuneler katı partikül ile aşındırma testine tabi tutuldular ardından yüzey sertlik ölçümü yapıldı. Ölçüm sonucunda Şekil 8.12'de verildiği gösterildiği gibi bir dakika süreyle yapılan bilyeli dövme işlemi yüzey sertliğini artırmıştır. Beş dakika süre ile yapılan yüzey sertleştirme işleminde maksimum sertlik oluşmuştur. Süre ile ters orantılı olarak ikinci ve üçüncü dakikalarda yüzey sertliği süre ile ters orantılı olarak azalmıştır. Üç dakika süre ile yapılan yüzey sertleştirme işleminde ise en düşük yüzey sertlik değerine ulaşılmıştır. Yüzey sertleştirme deneyinden sonra aşındırma işleminde tanecikler arasındaki mesafe

azalırken sertliğe olumlu katkı sağlamıştır. Beşinci dakikada ise azami sertliğe ulaşılmıştır. Deneyin bu aşamasından sonra ise yüzeyde kırılmalar ve aşınmalara bağlı olarak yüzey sertliğinde azalmalar gözlemlenmiştir

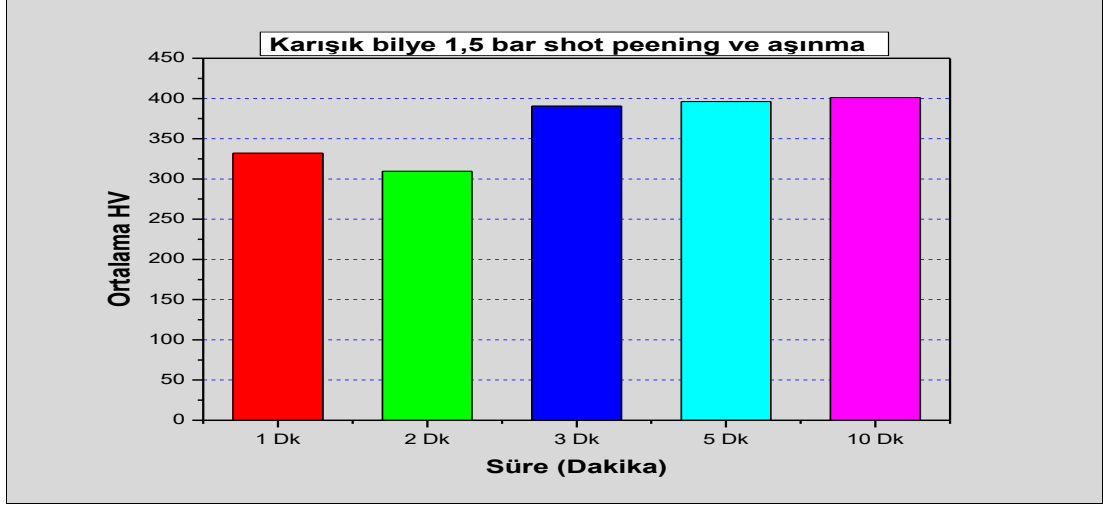


Şekil 8.13. Karışık bilye 1,5 bar bilye püskürtme sonrası yüzey sertlik grafiği

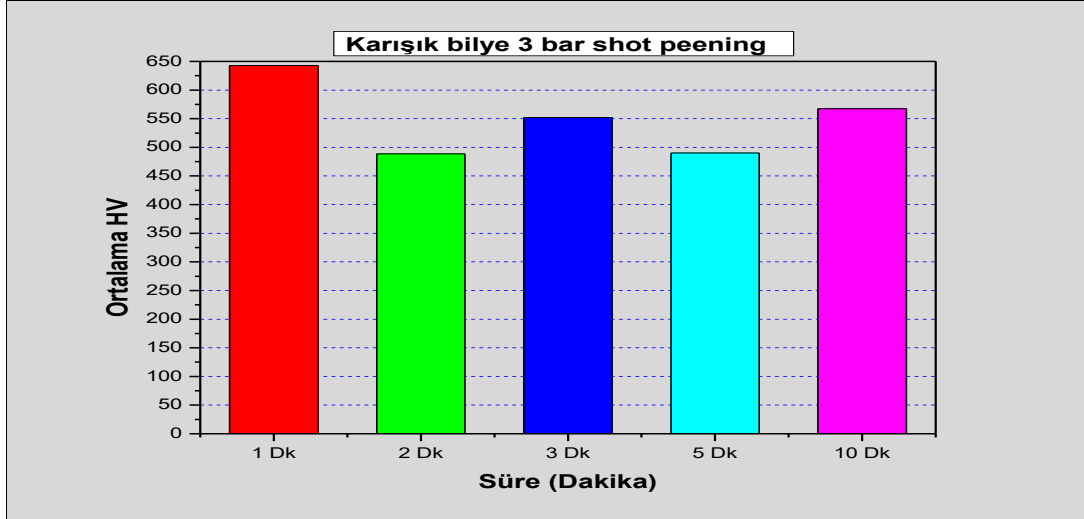
Inconel 718'in bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapıldığında numuneler üzerinde oluşan etkilerin daha belirgin olarak ortaya konulabilmesi için karışık boyutlarda çelik bilye 1,5 bar hava basınç kullanılarak 1, 2, 3, 5 ve 10 dakika süreyle bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemi yapılmıştır.

Şekil 8.13'de yüzey sertlik ölçümleri kıyaslanmıştır. Yüzey sertleştirme işlemi sertlik ölçümü ile kıyaslandığında 1 dakika da artmıştır 2. dakikada ise bir miktar düşüş gözlenmiştir bu düşüşün sebebi malzeme yüzeyinde kırılğan bir yapının oluşmasından dolayı olabileceği değerlendirilmiştir. 3. Dakikadan sonra belirgin bir artış gözlenmiş ve 10. dakikaya kadar azami sertlik değerini korumuştur.

Şekil 8.14'de 1.5 bar basınç ile karışık bilye ile bilyeli dövme sonrası verileri verilmiştir. 1,5 bar basınç ile karışık çelik bilye kullanılarak yapılan bilyeli dövme işleminden sonra aynı numuneler alümina 80 mesh ile erozif aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşınma testlerinden sonra yüzey sertlik ölçümleri yapılmıştır. Karışık bilye kullanılarak yapılan bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemi sonucunda bir dakika sertlik yükselirken ikinci dakika da sertlik nispeten azalmıştır. 3. Dakika ve sonrasında çok hafif şekilde yüzey sertliklerinde artış gözlemlenmiştir.



Şekil 8.14. Karışık bilye 1,5 bar aşınma sonrası yüzey sertlik grafiği

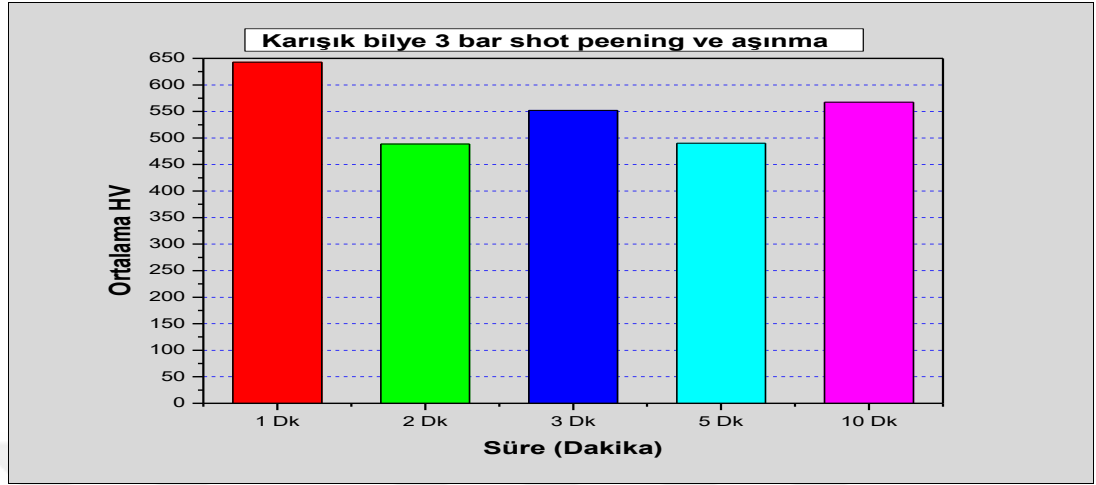


Şekil 8.15. Karışık bilye 3 bar yüzey sertleştirme yüzey sertlik grafiği

Inconel 718 numunelerinin bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme yapılırken en ideal parametreleri bulabilmek için farklı basınçlarda ve bilye boyutlarında farklı zamanlarda teste tabi tutulmuşlardır.

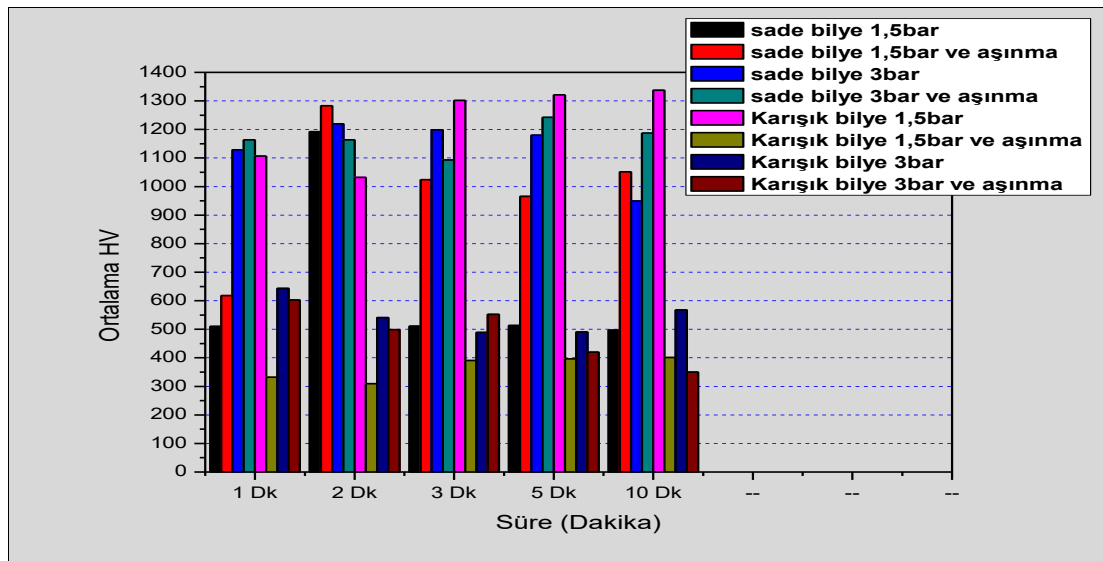
Şekil 8.14'de 3 bar basınç ile karışık bilye ile bilyeli dövme sonrası yüzey sertlik verileri verilmiştir. Testin bu aşamasında karışık bilye ve 3 bar basınç kullanılmıştır. Maksimum sertlik ilk bir dakika da ulaşılmıştır. Bu test basıncında ikinci dakika da ise yüzey sertliğinde belirgin bir düşme olmuştur. Bunun sebebi ise numune yüzeyinde malzeme aşınması ve kırılğan bir yapının oluşmasıdır. 3 dakika süre ile aynı basınçta test yapıldığında ise yüzey sertliğinde nispeten artış gözlenmiştir. 5 dakika süre ile

test yapıldığında ise tekrar yüzey sertliğinde düşme takip edilmiştir. 10 dakika boyunca test yapıldığında ise yüzey sertliğinde tekrar artış oluşmuştur



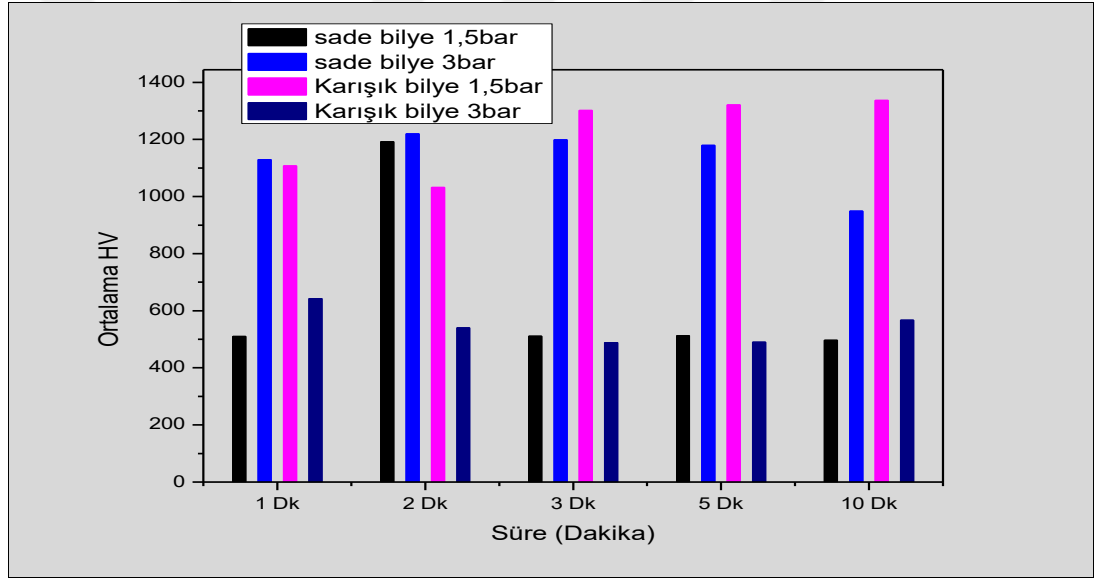
Şekil 8.16. Karışık bilye 3 bar yüzey sertleştirme, aşındırma yüzey sertliği

3 bar basınç ile karışık çelik bilye kullanılarak yapılan bilyeli dövme işleminden sonra aynı numuneler alümina 80 mesh ile eroziv aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşınma testlerinden sonra yüzey sertlik ölçümleri yapılmıştır. Karışık bilye kullanılarak yapılan bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemi sonucunda bir dakikada maksimum sertlik değerine ulaşmıştır. 1,5 bar ile aynı tip karışık bilye kullanılarak yapılan ile kıyaslandığında sertliklerde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. İkinci dakika da sertlik nispeten azalmıştır. 3. Dakika ve sonrasında çok hafif şekilde yüzey sertliklerinde artış gözlemlenmiştir



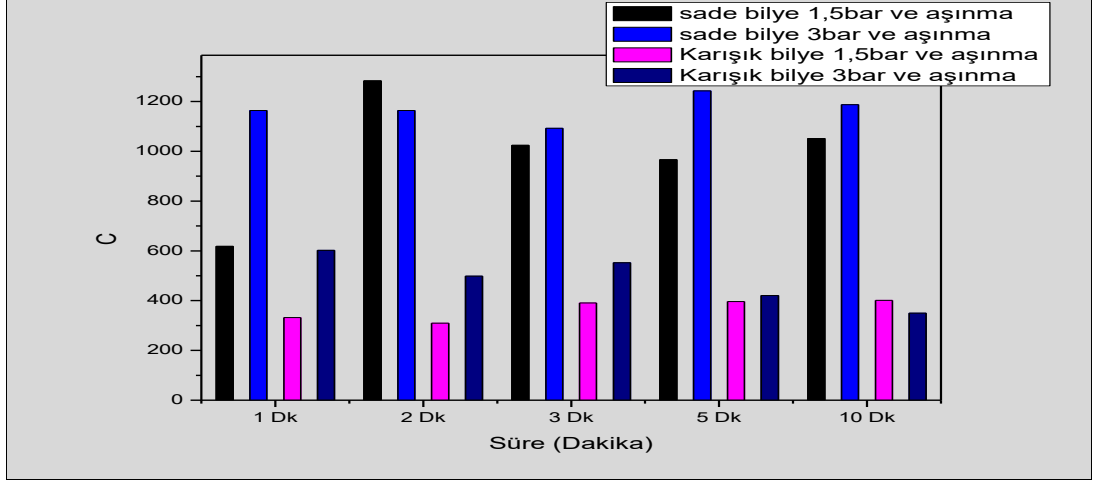
Şekil 8.17. Tüm sertlik değerlerinin kıyaslanması

Tüm yüzey sertlikleri birlikte değerlendirildiğinden 1 dakika süresi ile yapılan yüzey sertleştirmede sade bilye ile 3 bar püskürtme basıncı kullanılması yüzey sertliğini maksimum seviyeye getirdiği tespit edilmiştir. Karışık bilye kullanılması ise 1,5 bar püskürtme basıncı kullanılması her sürede bariz bir üstünlük sağlamıştır. Şekil 8.17'de görüldüğü şekilde sade bilye 3 bar püskürtme basıncı ile yapılan yüzey sertleştirmesi ikinci dakikada azami seviyeye gelmiştir. Şekil 8.17'de tüm sertlik verileri birlikte kıyaslandı. İnconel 718 yüzey sertleştirmesinde tüm aşamaların içerisinde karışık çelik bilye ile 1,5 bar püskürtme basıncı kullanılarak 10 dakika süresince yapılan yüzey sertleştirmesinde maksimum yüzey sertliğine ulaşılmıştır. En az yüzey sertliği ise karışık bilye kullanılarak 1,5 bar püskürtme basıncı ile yapılan yüzey sertleştirmesinden sonra yapılan aşındırma işleminde elde edilmiştir, bunun sebebi ise aşındırma sonucunda yüzeyde kalan kopmamış malzemelerdir.



Şekil 8.18. Bilye püskürtme sonrası yüzey sertlik değerleri

Şekil 8.18'de bilye püskürtme sonrası yüzey sertlik değerleri dört parametre verileri birlikte kıyaslandı. Dört parametre (sade bilye 1,5 ve 3 bar, karışık bilye 1,5 ve 3 bar) birlikte değerlendirildiğinde düşük uygulama süresinde sade bilye ile 3 bar püskürtme basıncı etkili olurken süre arttıkça karışık bilye 1,5 bar püskürtme basıncı daha etkili olmuştur. Aşındırma işleminden sonra dört parametre (sade bilye 1,5 ve 3 bar, karışık bilye 1,5 ve 3 bar) birlikte değerlendirildiğinde ise tüm uygulama sürelerinde sade bilye ile 3 bar püskürtme basıncı etkili olurken süre arttıkça sade bilye 1,5 bar püskürtme basıncının etkisi nispeten artmıştır.



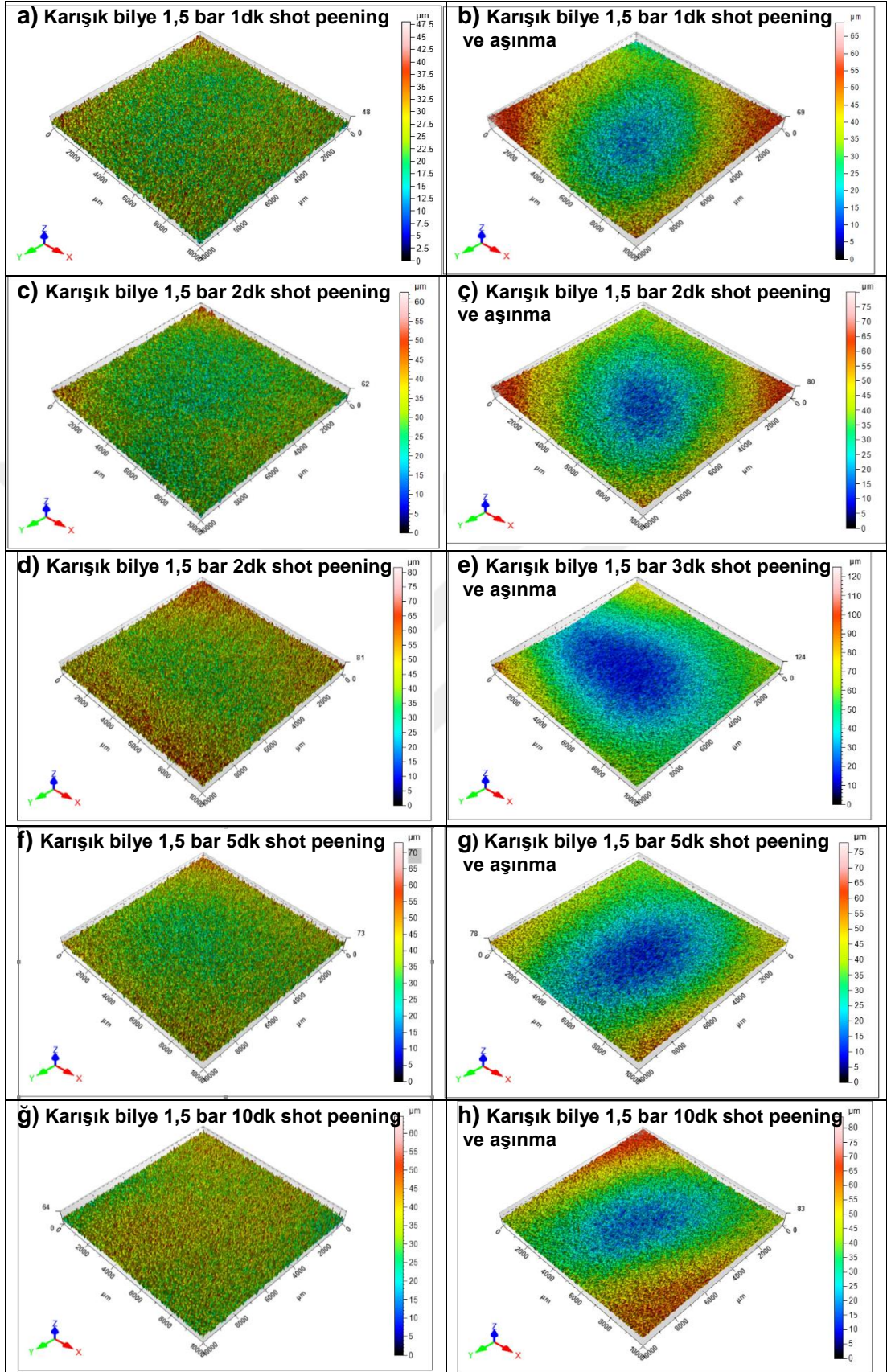
Şekil 8.19. Aşındırma sonrası yüzey sertlik değerleri

8.3. Yüzey Pürüzlülük Değerlendirmesi (Profilometre Görüntüleri)

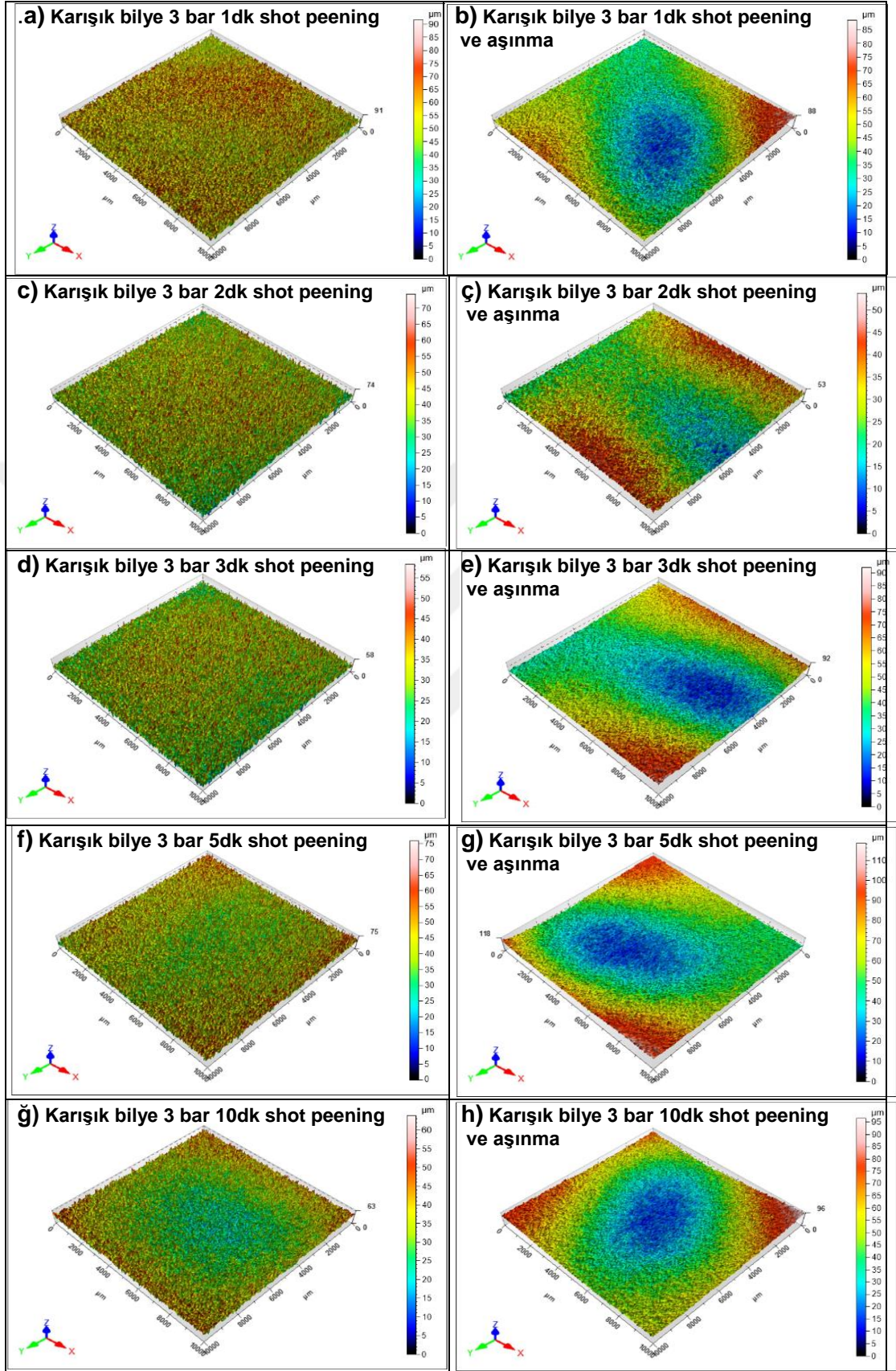
Inconel 718 numuneleri bilye püskürtme (shot peening) yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemine tabi tutuldu. Bilye püskürtme işlemi karışık boyutlarda çelik bilye 1,5 bar püskürtme basıncı ile 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika olmak üzere 5 farklı süre boyunca uygulandı. Bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapılan numunelerin yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı. Ardından katı partükül ile erozif aşınma testine tabi tutuldu. Bu işlemden sonra tekrar yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı.

Elde edilen sonuçlara göre, Şekil 8.20'de, atma işlemi sırasında maruz kalma süresi Inconel 718'in yüzey topografisi üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Test süreleri 120 ve 180 saniyede, lokal plastik deformasyon zonu meydana gelmiş ve heterojen yüzey dokusu gözlenmiştir (Şekil 10.20.c,ç ve d,e). Pozlama süresinin 600 saniyeye çıkarılması, homojen bir yüzey dokusu ve numune yüzeyinin her tarafına yayılan plastik deformasyon bölgesi ile sonuçlandı (Şekil 8.20.f-g). Çelik bilye parçacıklarının çekiçleme etkisi yüzey topografisi özelliklerini artırır. Ayrıca, çelik bilyaların tüm yüzeye etkilerinin yayılması, artan bir Sa değeriyle sonuçlandı.

Bilye püskürtme işlemi karışık boyutlarda çelik bilye 3 bar püskürtme basıncı ile 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika olmak üzere 5 farklı süre boyunca uygulandı. Bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirilmesi yapılan numunelerin yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı. Ardından katı partükül ile erozif aşınma testine tabi tutuldu. Bu işlemden sonra tekrar yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı.



Şekil 8.20. Karışık bilye 1,5 bar yüzey sertleştirme ve aşınma analizleri

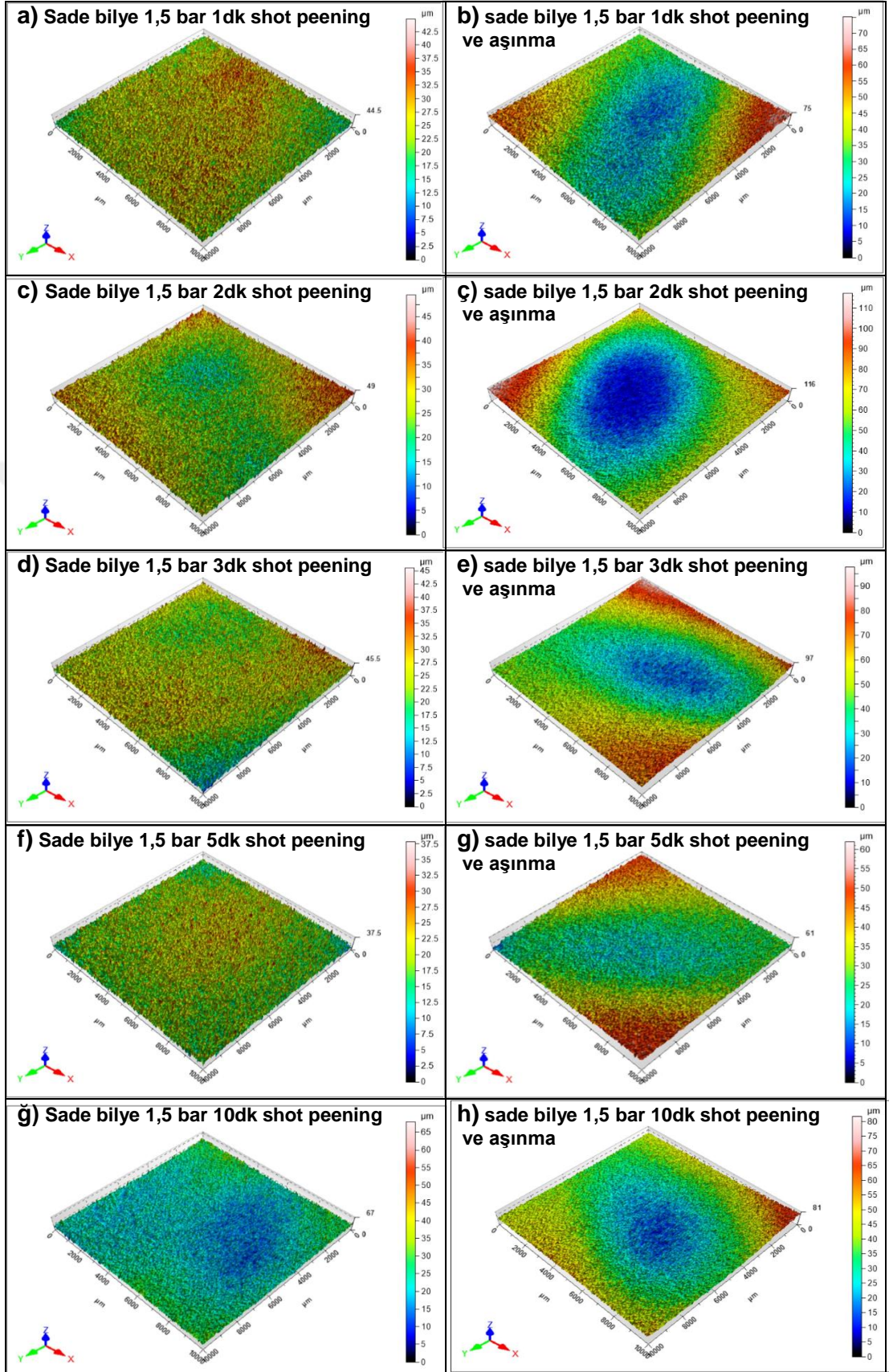


Şekil 8.21. Karışık bilye 3 bar yüzey sertleştirme ve aşınma analizleri

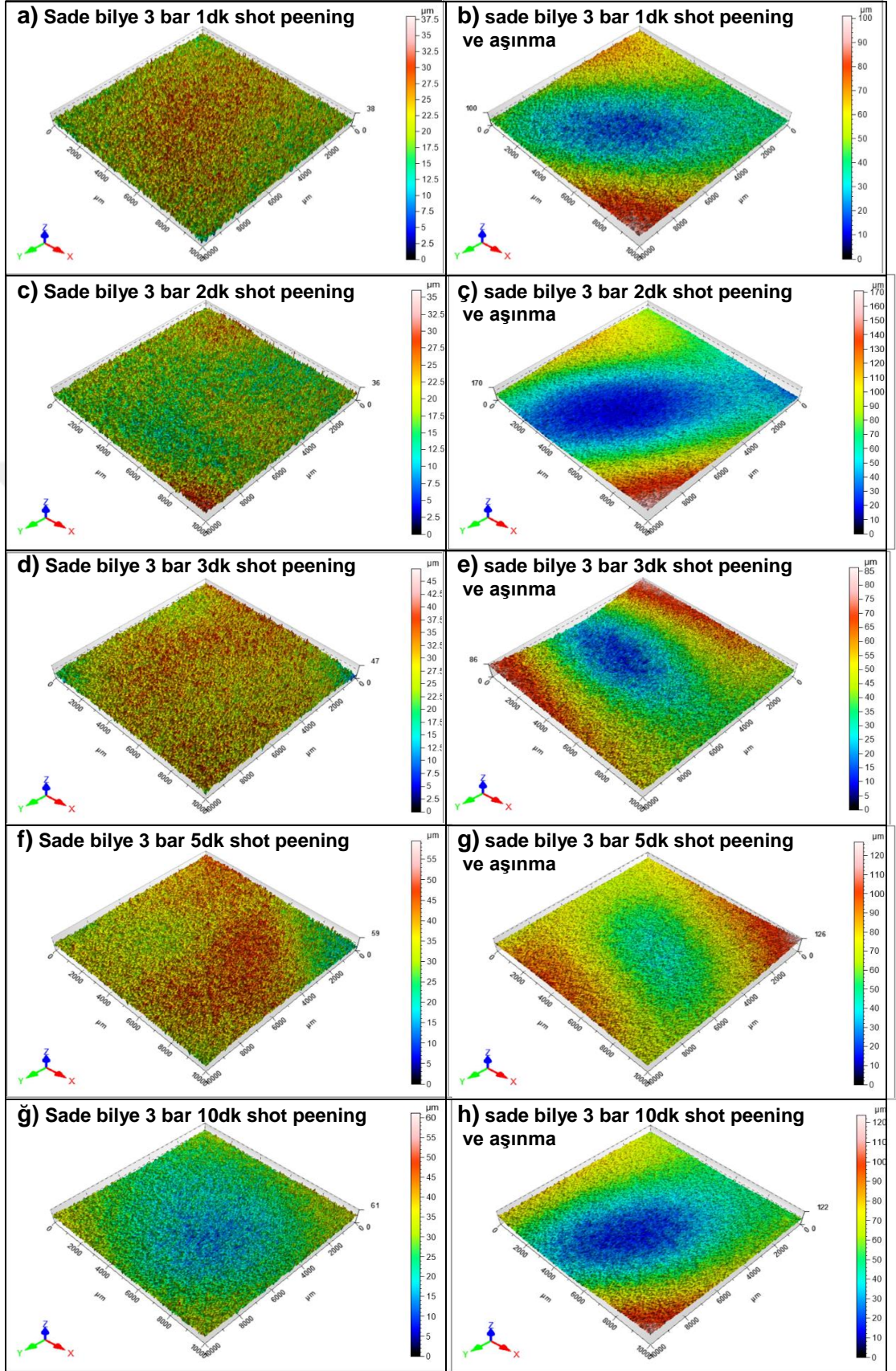
Şekil 8.21'de, yüzey sertleştirmesi için artan püskürtme basıncının 1,5 bar'dan 3 bar'a olan etkisini açıklamak için; yüzey pürüzlülüğünün değişimi, maruz kalma süresine göre çizilmiştir. 3 bar püskürtme basıncında, maruz kalma süresinin etkisi Şekil 8.21. a, b, c, d, e, f, g, ğ, h'de görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüğü ve topografya üzerinde çok az etkiye sahiptir. 60, 300 ve 600 saniyede bir lokalize yüzey deformasyon bölgesi oluştu. Ayrıca, 120 ve 180 saniyelik test sürelerinde, çekiçleme etkisi tüm numune yüzeyine yayılmıştır (Şekil 8.21.b,c ve -d,e)

Yüzey sertleştirmesi için bilye püskürtme işlemi sade bilye (80mesh) 1,5 bar püskürtme basıncı ile 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika olmak üzere olarak 5 farklı süre boyunca uygulandı. Bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirmesi yapılan numunelerin yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı. Ardından katı partükül ile erozif aşınma testine tabi tutuldu. Bu işlemden sonra tekrar yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı.

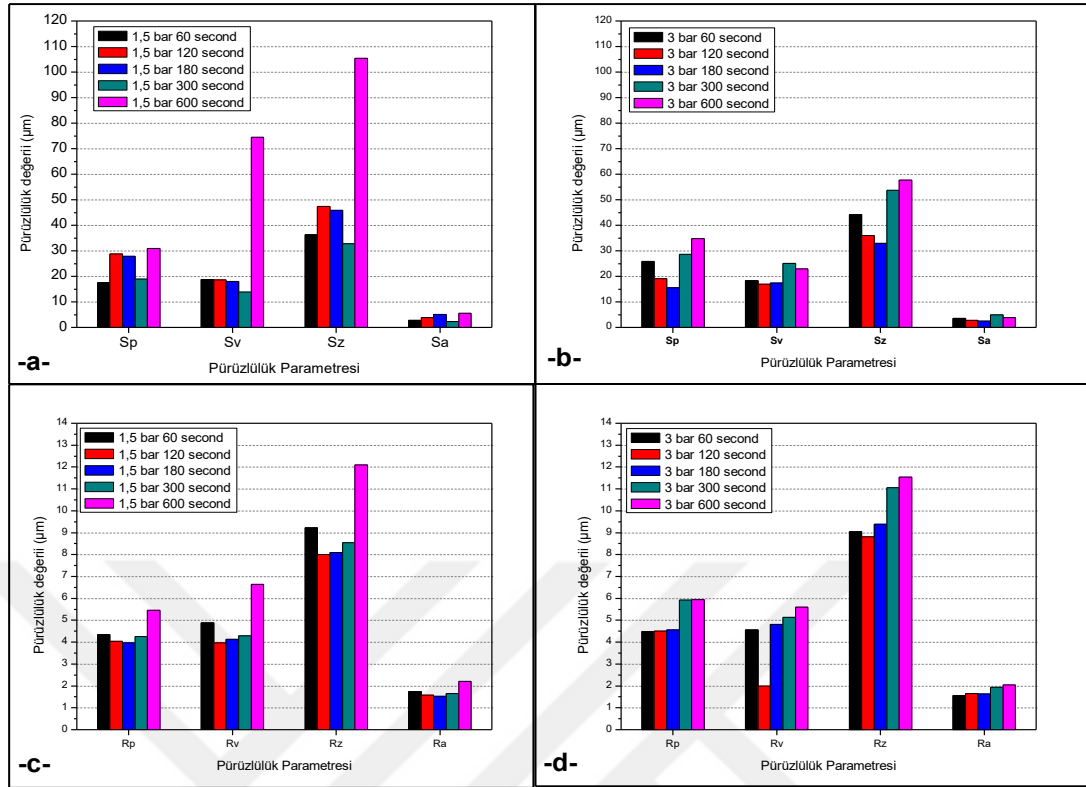
Yüzey sertleştirmesi için bilye püskürtme işlemi sade bilye (80mesh) 3 bar püskürtme basıncı ile 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika olmak üzere olarak 5 farklı süre boyunca uygulandı. Bilye püskürtme yöntemi ile yüzey sertleştirmesi yapılan numunelerin yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı. Ardından katı partükül ile erozif aşınma testine tabi tutuldu. Bu işlemden sonra tekrar yüzey pürüzlülük analizleri yapıldı



Şekil 8.22. Sade bilye 1,5 bar yüzey sertleştirme ve aşınma analizleri



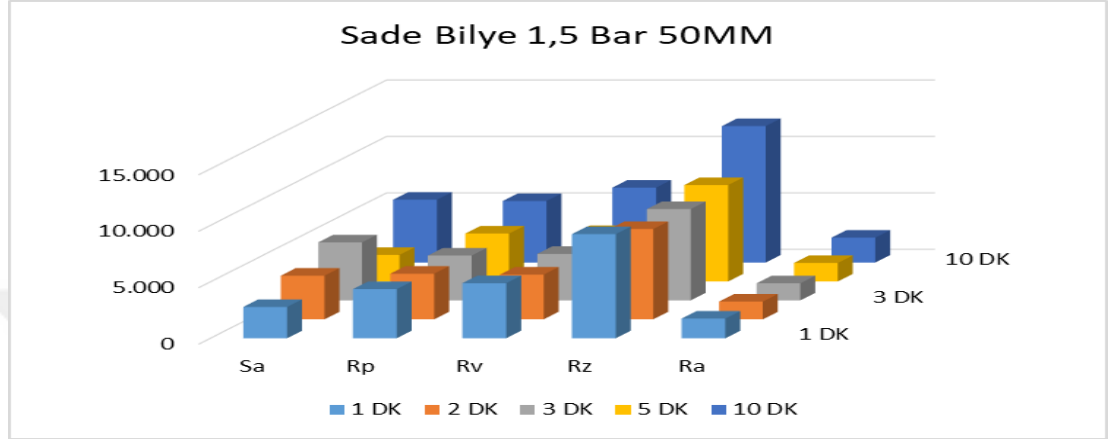
Şekil 8.23. Sade bilye 3 bar yüzey sertleştirme ve aşınma analizleri



Şekil 8.24. Yüzeş pürüzlülük verilerinin gruplandırılması

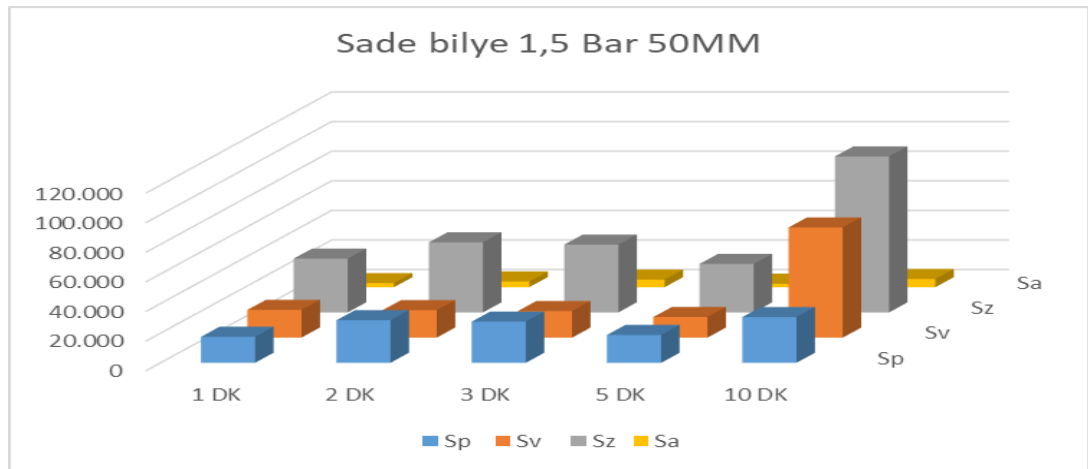
Yüzeş pürüzlülüğü değerlendirmesi iki yolla sağlanabilir. Yüzeş X ve Y yönünde ve yüzeş alanı pürüzlülüğünü (Sa) tarayarak. Öte yandan, etkilenen bölgeden bir profil çizgisinin taranması ve Ra olarak adlandırılan çizgi pürüzlülüğünün değerlendirilmesi. Yüzeş pürüzlülüğü değerlendirmelerinde Sv, vadi derinliğini göstermektedir; Spanın zirveleri yüzeşden kaynaklanır; En yüksek zirvenin en derin vadisinin en tepesinden Sz dikey mesafe ve son olarak Sa, taranan yüzeşin tamamında ortalama pürüzlülük değerini ima eder. Şekil 8.24.a'da, en az Sa 60 saniyede gözlemlenen maksimum Sa değeri, 60 saniyede en az Sa iken. Patlama basıncını 1,5 bar'dan 3 bara yükselterek (Şekil 8.24.b), maksimum Sa 300 saniyede gözlemlendi. Sonuç olarak, artan basınç, Sz hariç 600 saniyede S değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Patlama basıncını 3 bara yükselterek Sz değerini büyük ölçüde azaltır. Şekil 8.24.c'de, 1,5 bar etkilenmiş numunenin R değerleri verilmiştir. Maksimum Ra 600 saniyede en az 180 saniyede gözlemlendi. Rz, yüzeş hasarları nedeniyle meydana gelen vadi tabanından tepenin üstünden maksimum dikey mesafeyi ifade eder. Şekil 8.24.c'de, maksimum Rz 600 saniyede test süresiyle ölçülürken, ikinci maksimum değer 60 saniyede gözlemlenmiştir. Bu, atış gravür işleminin başlangıcında başlangıçtaki ciddi yüzeş bozulmasına bağlanabilir. Dağınık çarpma yapan çelik parçacıkları heterojen bir yüzeş plastik deformasyon yapısına ve pürüzlülüğe neden oldu. Rp ve Rv değerleri

Şekil 8.24.c'de görüldüğü gibidir ve alt yüzey ve aşırı yüzeydeki plastik deformasyon etkilerinin benzer olduğu anlamına gelir. Şekil 8.30.d, 1,5 bar'dan 3 bar'a kadar artan patlatma basıncının pürüzlülük üzerinde ciddi bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Maksimum Ra 600 saniyede gözlenirken, en az 60 saniye boyunca gözlemlenmiştir

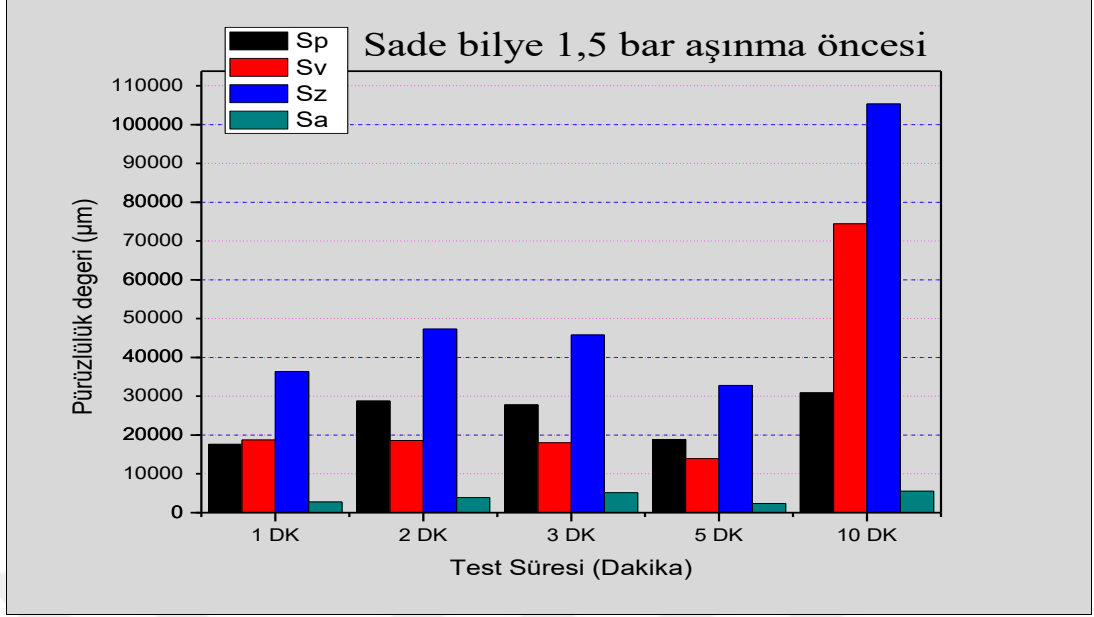


Şekil 8.25. Sade bilye 1,5 bar yüzey pürüzlülük

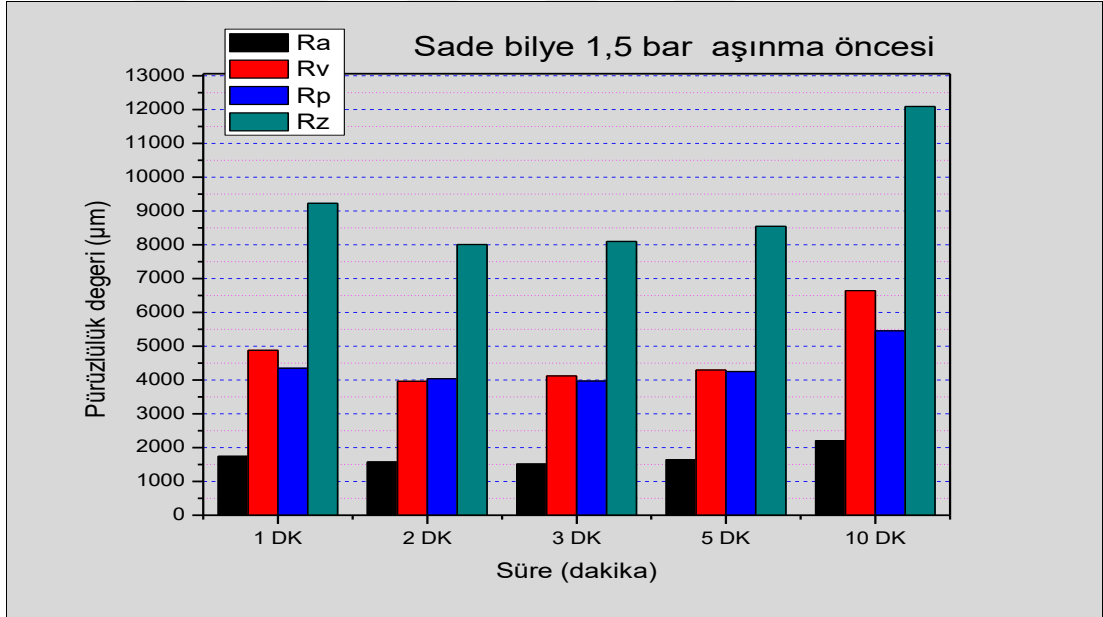
Inconel 718 numunelerine tek boyut çelik bilye kullanılarak bilyeli dövme yöntemi ile yüzey sertleştirme yapılmıştır. Yüzey sertleştirme işlemi farklı numune üzerinde 1 dakika, 2 dakika, 3 dakika, 5 dakika ve 10 dakika boyunca uygulanmıştır. Yüzey sertleştirmesinden sonra yüzey pürüzlülüğüne etkisinin anlaşılabilmesi için temassız profilometre ile yüzey analizleri yapılmıştır. Zaman arttıkça Rp, Rv, Rz ve Ra değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak Ra değeri ön plana alındığında ilk dört zaman diliminde belirgin bir fark oluşmadığı onuncu dakika da ise artış gözlenmiştir.



Şekil 8.26. Sade bilye 1,5 bar bilye püskürtme S pürüzlülük değerleri 3D

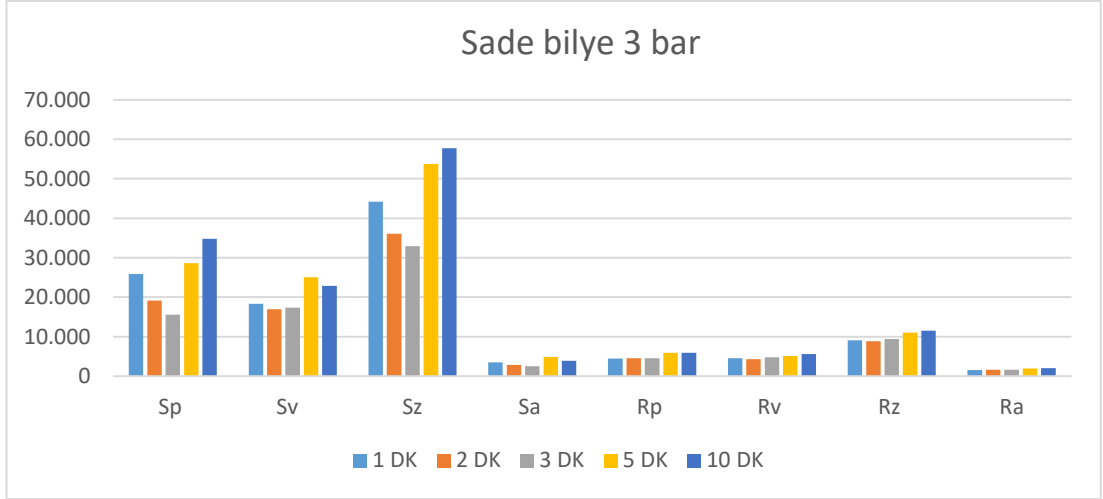


Şekil 8.27. Sade bilye 1,5 bar bilye püskürtme S pürüzlülük değerleri

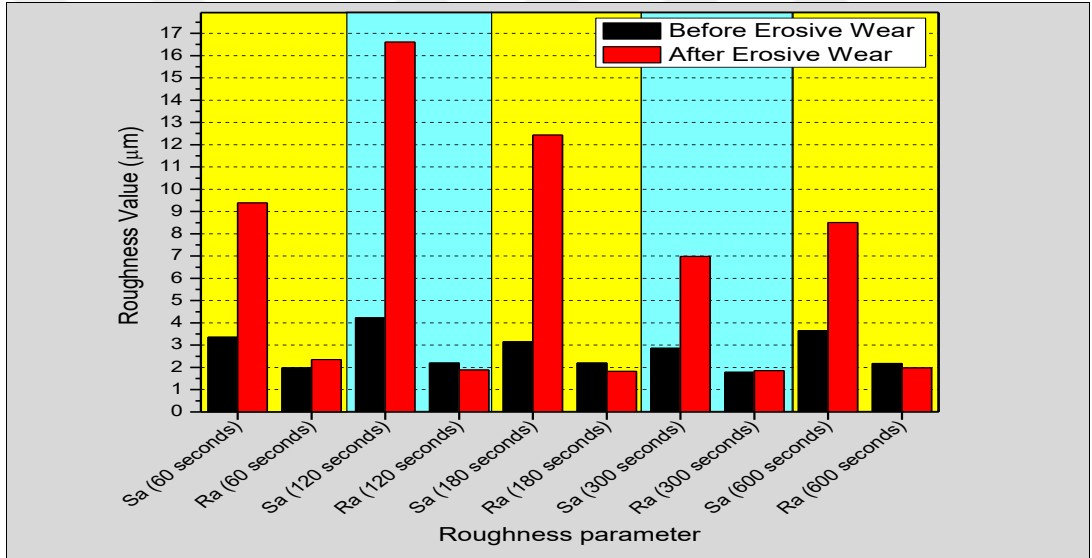


Şekil 8.28. Sade bilye 1,5 bar bilye püskürtme R pürüzlülük değerleri

80 mesh çelik bilye ile yapılan yüzey sertleştirme deneyinden sonra temassız profilometre ile yüzey pürüzlülük analizi yapılmıştır. Yüzey sertleştirme işlem süresi artıkça Ra da artışlar gözlenmiştir. Rp (pürüzlülük tepe noktalarında) da 1 dakika da yüksek bir değere yakın oluşmuştur. En yüksek tepe noktalar ise 10 dakika süre ile yüzey sertleştirme yapılan numunede tespit edilmiştir.



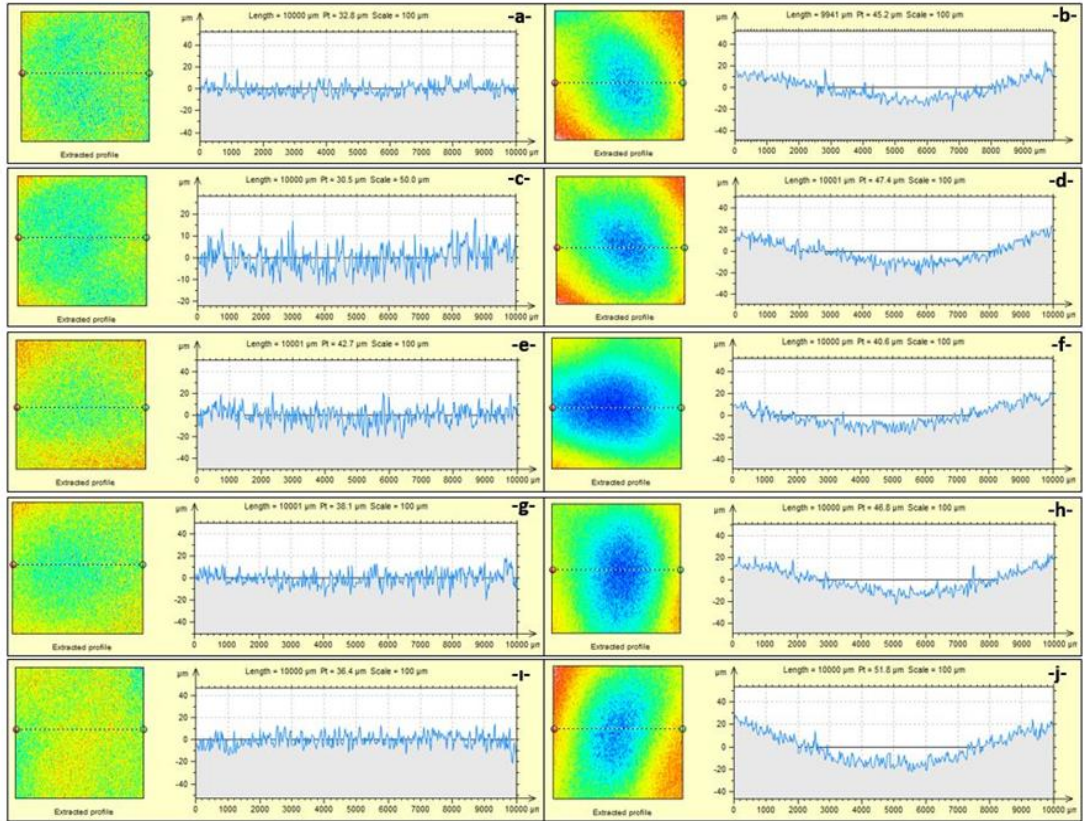
Şekil 8.29. Sade bilye 3 bar bilye püskürtme yüzey pürüzlülüğü



Şekil 8.30. Aşınma öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü [24]

Yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmesi iki yolla sağlanabilir. Yüzeyi X ve Y yönünde ve yüzey alanı pürüzlülüğünü (Sa) tarayarak. Öte yandan, etkilenen bölgeden bir profil çizgisinin taranması ve Ra olarak adlandırılan çizgi pürüzlülüğünün değerlendirilmesi. Yüzey pürüzlülüğü değerlendirmelerinde Sv, vadi derinliğini göstermektedir; Spanın zirveleri yüzeyden kaynaklanır; En yüksek zirvenin en derin vadisinin en tepesinden Sz dikey mesafe ve son olarak Sa, taranan yüzeyin tamamında ortalama pürüzlülük değerini ima eder. Şekil 8.30'de 120 saniye aşınma aşınma testinde gözlemlenen maksimum Sa değeri. Bu, Şekil 8.30.de görüldüğü üzere maksimum 120 saniyede maksimum kütle kaybına atfedilebilir. Yüzey topografisi, eroziv alümina partiküllerinin

tekrarlanan etkileri ile ciddi şekilde hasar gördü. 300 saniye süren atış sonrası dövme Inconel 718'den sonra gözlemlenen minimum erozyon testlerinde en az Sa gözlemlenmiştir. Bu nedenle, 300 saniyeye varan atış püskürtme işlemi süresi, kütle kaybını azaltmakta ve katı parçacık erozyonuna karşı yüzey direncini arttırmaktadır. Üstelik, 300 saniyenin üzerinde artan atış-talaşı işlem süresi, Sa'yı negatif bir şekilde etkiledi ve 600 saniyelik atış testi, erozyon aşınma testlerinden sonra, 300 saniyelik test ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir Sa değeri ile sonuçlandı. Erozyon testleri atış vuruşundan sonra 120, 180 ve 300 saniye için Inconel 718 minimum Ra değerleri ile sonuçlanmıştır, ancak bu sonuçlar birbirine çok yakındır. 60 ve 600 saniye süren vurulan numuneler, katı parçacık erozyon testleri sonrasında daha yüksek Ra değerlerine sahiptir



Şekil 8.31. Erozyon krateri orta noktası R_a değerleri (a) 60 saniye boyunca bilya ile dövülmüş; erozyon testinden önce ,(b) 60 saniye boyunca bilya ile dövülmüş; erozyon testinden sonra ,(c) 120 saniye boyunca bilya ile dövülmüş; erozyon testinden önce, (d) 120 saniye boyunca bilya ile dövülmüş; erozyon testinden sonra ,(e) 180 saniye süreyle bilya ile dövülmüş; erozyon testinden önce ,(f) 180 saniye boyunca bilya ile dövülmüş; erozyon testinden sonra (g) 300 saniye süreyle bilya ile dövülmüş; erozyon testinden önce , (h) 300 saniye süreyle bilya ile dövülmüş; erozyon testinden sonra ,(i) 600 saniye boyunca bilya ile dövülmüş; erozyon testinden önce, (j) 600 saniye süreyle bilya ile dövülmüş; erozyon testinden sonra

Elde edilen sonuçlara göre, Şekil 8.31'de, yüzey R_a değeri üzerindeki katı partikül erozyonun etkisi, erozyon krater topoğrafyasında hasar ile değişmektedir. 120, 180 ve 600 saniyelik bilyeli dövme sürelerinde (Şekil 8.31.c, 8.31.e, 8.31.i) erozyon testleri öncesi R_a değerleri 60 ve 300 saniyeden yüksektir (Şekil 8.31.a, 8.31.g). Aşındırıcı aşınma testinin etkisi yüzey topografisinde erozyon krater formasyonu olarak açıkça görülebilir. Krater, beklendiği gibi 30° 'lik bir yüzeyde eliptik bir geometriye sahiptir. Yüzeydeki erozyonun daha fazla yayılması, 180 saniye boyunca çekilen örnekleme için belirgindir (Şekil 8.31.f). Erozyon testi, 600 saniyelik bilyeli dövme işleminden sonra uygulanan erozyon testleri ile maksimum düzeydedir (Şekil 8.31.j). Bu, 600 saniyelik bilyeli dövme işleminden sonra dövmenin etkisi nedeniyle daha yüksek yüzey sertliğine bağlanabilir.



9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İnsanlık tarihi boyunca aletlerin ve metallerin dayanımı artırmak değişik yöntemler geliştirilmiştir. Klasik yöntemlerden birisi olan kılıç üretiminde çekiç ile dövülerek sertleştirme işlemine tabi tutulmaktaydı. Bu yöntem günümüzde de birçok malzemenin üretiminde de kullanılmaktadır ancak küçük ve yüzeyleri değişik geometrik yapıda olan malzemeler çekiç ile dövülerek sertleştirme işlemi yapılamamaktadır. Bu eksikliği gidermek ve malzemelerin dayanımını artırmak için bilyeli dövme yöntemi geliştirilmiş çok küçük parça yüzeylerinde ve değişik geometri yapılarıdaki malzemelerde verimli şekilde kullanılabilir. Bu yöntemin inconel 718 üzerindeki etkisinin araştırılması ve uygun parametrelerin belirlenebilmesi için bu çalışma tamamlanmıştır.

Inconel 718 test numuneleri, sırasıyla 60, 120, 180, 300 ve 600 saniye için bilye püskürtme işlemi yapılmıştır. Bu beş test süresinde, 1,5 bar ve 3 bar olan iki farklı test basıncı gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, iki önemli test parametresi, test süresi ve püskürtme basıncı analiz edildi. Temassız lazer profilometresi kullanılarak yüzey topografisi ve pürüzlülük değerlendirildi.

Yüzey pürüzlülüğü değerlendirmesi iki yolla sağlanabilir. Yüzeyi X ve Y yönünde ve yüzey alanı pürüzlülüğünü (S_a) tarayarak. Öte yandan, etkilenen bölgeden bir profil çizgisinin taranması ve R_a olarak adlandırılan çizgi pürüzlülüğünün değerlendirilmesi. Yüzey pürüzlülüğü değerlendirmelerinde S_v , vadi derinliğini göstermektedir; S_{pan} zirveleri yüzeyden kaynaklanır; En yüksek zirvenin en derin vadisinin en tepesinden S_z dikey mesafe ve son olarak S_a , taranan yüzeyin tamamında ortalama pürüzlülük değerini ima eder. Şekil 8.30.a'da, en az S_a 60 saniyede gözlemlenen maksimum S_a değeri, 60 saniyede en az S_a iken. Patlama basıncını 1,5 bar'dan 3 bara yükselterek (Şekil 8.30.b), maksimum S_a 300 saniyede gözlemlendi. Sonuç olarak, artan basınç, S_z hariç 600 saniyede S değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir. Patlama basıncını 3 bara yükselterek S_z değerini büyük ölçüde azaltır. Şekil 8.30.c'de, 1,5 bar etkilenmiş numunenin R değerleri verilmiştir. Maksimum R_a 600 saniyede en az 180 saniyede gözlemlendi. R_z , yüzey hasarları nedeniyle meydana gelen vadi tabanından tepenin üstünden maksimum dikey mesafeyi ifade eder. Şekil 8.30.C'de, maksimum

Rz 600 saniyede test süresiyle ölçülürken, ikinci maksimum değer 60 saniyede gözlenmiştir. Bu, atış gravür işleminin başlangıcında başlangıçtaki ciddi yüzey bozulmasına bağlanabilir. Dağınık çarpma yapan çelik parçacıkları heterojen bir yüzey plastik deformasyon yapısına ve pürüzlülüğe neden oldu. Rp ve Rv değerleri Şekil 8.30.c'de görüldüğü gibidir ve alt yüzey ve aşırı yüzeydeki plastik deformasyon etkilerinin benzer olduğu anlamına gelir. Şekil 8.30.d, 1,5 bar'dan 3 bar'a kadar artan patlatma basıncının pürüzlülük üzerinde ciddi bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Maksimum Ra 600 saniyede gözlenirken, en az 60 saniye boyunca gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, Şekil 8.20'de, bilye püskürtme işlemi sırasında maruz kalma süresi Inconel 718'in yüzey topografisi üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir. Test süreleri 120 ve 180 saniyede, lokal plastik deformasyonzonu meydana gelmiş ve heterojen yüzey dokusu gözlenmiştir (Şekil 8.20.b ve 8.20.c). Pozlama süresinin 600 saniyeye çıkarılması, homojen bir yüzey dokusu ve numune yüzeyinin her tarafına yayılan plastik deformasyon bölgesi ile sonuçlandı (Şekil 8.20.e). Çelik bilye parçacıklarının çekiçleme etkisi yüzey topografisi özelliklerini artırır. Ayrıca, çelik bilyelerin tüm yüzeye etkilerinin yayılması, artan bir Sa değeriyle sonuçlandı.

Şekil 8.29.'da, artan atış sertleştirme basıncının 1,5 bar'dan 3 bar'a olan etkisini açıklamak için; Yüzey pürüzlülüğünün değişimi, maruz kalma süresine göre çizilmiştir. 3 bar püskürtme basıncında, maruz kalma süresinin etkisi Şekil 8.29. a, b, c, d ve e'de görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüğü ve topografya üzerinde çok az etkiye sahiptir. 60, 300 ve 600 saniyede bir lokalize yüzey deformasyon bölgesi oluştu. Ayrıca, 120 ve 180 saniyelik test sürelerinde, çekiçleme etkisi tüm numune yüzeyine yayılmıştır (Şekil 8.29.b ve 8.29.c).

Bu çalışmada, Shot peening (bilye püskürtme) parametrelerinin Inconel 718 üzerindeki etkisi ve yüzey pürüzlülüğü deneysel olarak incelenmiştir. Inconel 718'de bilye püskürtme işleminin performansını değerlendirmek için, yüzey pürüzlülüğü değerleri, maruz kalma süresine ve püskürtme basıncına göre karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1,5 bar'lık patlatma basıncında, artan maruz kalma süresi, 120 ve 180 saniyede Ra'yı azaltır, ancak tersine bir eğilim oluşur ve Ra değerleri 300 ve 600 saniyede artar. Maksimum Ra 600 saniyede gözlemlendi. 1,5 bar püskürtme basıncında, Rp ve

Rv değerleri artan maruz kalma süresiyle artar. Nominal değerler Rp ve Rv için benzerdi. Rz değeri 1,5 bar basınçta en fazla 600 saniyeydi. 3 3 bar patlatma basıncında, artan maruz kalma süresi Ra değerlerini artırır.

Maksimum Ra 600 ve 300 saniyede gözlemlendi. Ra değerleri 300 ve 600 saniyede çok yakındı. Artan patlatma basıncı, Ra üzerinde 300 ve 600 saniye süreyle maruz kalma süresini ortadan kaldırır. 3 3 bar patlatma basıncında, Rp ve Rv değerleri artan maruz kalma süresiyle artar. Rp ve Rv değerleri, sonuçların 1,5 bara benzerdi.

Bu, atış-çekişleme işleminden sonra yüzey sertleştirme etkisine atfedilebilir. 3 bar basıncındaki Rz değeri maksimum 600 saniyedir. Ar Yüzey yüzey pürüzlülüğü Sa, her iki patlatma basıncı için de benzerdi. Inconel 718 yüzeyine 600 saniye çelik bilye maruz kaldıktan sonra, 1,5 bar basınçta, Sa değeri 3 bar basıncından biraz daha yüksek.

Erozyon direncini bulmak için, bilye püskürtme işleminden sonra Inconel 718'e katı partikül erozyon testi uygulanmıştır. Inconel 718 test örnekleri aşındırıcı Al₂O₃ partikülleriyle 50 mm'lik nozul mesafesinden 20 saniye boyunca püskürtüldü. Kum ve toz partiküllerini gidermek için erozyon testlerinden önce ve sonra hava püskürterek temizlenmiş örnekler daha sonra $\pm 0,1$ mgr'lık bir hassasiyetle elektronik terazide tartılmıştır. Katı parçacık erozyon testi, ASTM G-76'ya göre gerçekleştirilmiştir. Inconel 718'in kütle kaybı, katı parçacık erozyon testlerinden sonra 48,48 mg olarak ölçüldü. Beş testin ortalaması alınarak hesaplanan ortalama kütle kaybı. Şekil 8.2'de verilen kütle kaybı grafiğinde belirtildiği gibi gerçekleşmiştir.

Şekil 10-8, shot-peening süresi süresinin, Inconel 718'in kütle kaybı üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Inconel 718'in katı parçacık erozyonu üzerindeki shot peening etkisini incelemek için, sırasıyla, 60, 120, 180, 300 ve 600 saniyelere ve daha sonra katı parçacık erozyonuna uygulanan testler gerçekleştirildi. Inconel 718, erozyona karşı aşınma için atış-vurma işlemi olmadan test edildi ve kütle kaybı bu durum için 48,48 mgr olarak ölçüldü. Elde edilen sonuçlar, shot-peened örnekleri ile karşılaştırıldığında, shot-peening Inconel 718'in 120 ve 180 saniye boyunca kütle kaybından sonra arttığını göstermektedir. Bu, bileme işlemi sırasında test süresi nedeniyle geçici malzeme kaybına bağlanabilir. 120 ve 180 saniyeden farklı olarak, 60, 300 ve 600 saniye boyunca çekilen numuneler daha iyi bir erozyon direnci ve kitle kaybında azalma olduğunu göstermektedir. İşlemden büyük ölçüde etkilenen 300 ve

600 saniye süren numuneler ve kitle kaybında gözle görülür bir azalma gözlemlendi. Bilye püskürtme işleminin test süresi, Inconel 718 için 180 saniye gibi kritik bir sürenin üzerinde kitle kaybı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Bu çalışmada Inconel 718 eroziv aşınma direnci ve yüzey pürüzlülüğü üzerine bilyeli atış parametrelerinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bilye püskürtme işleminin Inconel 718 erozyon aşınma davranışına etkisini değerlendirmek için kitle kaybı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri maruz kalma süresine göre karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan şu sonuçlara ulaşılmıştır: 1,5 bar'lık püskürtme basıncında, östrojen Al₂O₃ parçacıkları 70 m / s'lik bir hız kazanmıştır; 80 mesh (150-212µm) partikül büyüklüğüne sahiptir. In Inconel 718 örneklerinde, 120 ve 180 saniye süren atışlarda erozyon testi sonuçları, kitle kaybının, bilye atmadan yapılan örneklerle kıyaslandığında arttığını göstermiştir. Bundan dolayı, 120 ve 180 saniye süren bilye püskürtme süreleri, Inconel 718'in erozyona karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. 60, 300 ve 600 saniyelik bilye püskürtme için Inconel 718 erozyonu, katı parçacık erozyon testleri azaldıktan sonra erozyon direncini ve kitle kaybını azaltmaktadır. 300 ve 600 saniye süren örneklerde gözlemlenen minimum kitle kaybı. Shot-peened Inconel 718'in kitle kaybı değerleri 300 ve 600 saniye arasında birbirine çok yakındır.

Inconel 718 süper alaşımı yüzey sertleştirilmesi açısından; bu tez çalışmasında en yüksek yüzey sertliğine sade bilye ile 1,5 bar püskürtme basıncı ile yapılan işlemde ulaşılmıştır. Süre arttıkça yüzey sertliği de doğru orantılı olarak artmıştır. Aşınma açısından ise en iyi değere karışık çelik bilye 3 bar püskürtme basıncı ile 2 Karışık bilye ile 1,5 bar püskürtme basıncı kullanılarak yapılan bilyeli dövme işleminde en yüksek yüzey sertliğine ulaşılmış olmasına rağmen aşınma testi sonrası yüzey sertliğinde ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu parametreler ile yapılan işlemde yüzey sertliği malzeme yüzeyinde kaldığı derinliğe ulaşmadığı ve aşınma ile bu sertliğin gittiği değerlendirilmiştir dakika süresince uygulanan bilyeli dövme yönteminde ulaşılmıştır. Sade bilye 1,5 bar ile yapılan işlemde yüzey sertleştirmesinden sonraki aşınma testlerinin yüzey sertliğine pozitif katkı yaptığı görülmüştür. Aşınma öncesi ve sonrası birlikte değerlendirildiğinde 80 mesh çelik bilye kullanılarak 3 bar üfleme basıncı ile 2 ve 3dk süresince yapılan işlemin daha verimli olduğu değerlendirilmiştir.

Inconel 718 kullanılarak üretilen malzemede yüzey sertliği mi, yüzey pürüzlülüğü mü yoksa aşınma dayanımı mı daha önemli ona göre uygun parametreler seçilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Betteridge W., Heslop J., *The Nimonic Alloys, and Other Nickel-Base High-Temperature Alloys*, Elsevier Applied Science, New York, 1974.
- [2] Tekkumlama http://www.tekkumlama.com/index.php/celik_bilya.html, (Ziyaret Tarihi: 15 Eylül 2018).
- [3] Bradley E., *Source Book on Materials for Elevated-Temperature Applications*, Metals Park, Ohio, 1979.
- [4] Flint Wild, www.nasa.gov, (Ziyaret Tarihi: 10 Augustos 2018).
- [5] Edward A. L., Recent Developments in The Progress Of Superalloy 718, *JOM*, 1992, **44**(6), 33-36.
- [6] Roger C. R., *The Superalloys Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, London, 2006.
- [7] Kulkarni V. V., Kulkarni L. V., Effect of Shot Velocity on Residual Stresses in Shot Peening, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*,2014, **3**, 1284-1287.
- [8] Hagel W., Wiley J., *The Superalloys*, Wiley-Interscience, New York, 1972.
- [9] Choudhury I., El-Baradie M. A., Machinability of Nickel-Base Super Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **77**, 278-284.
- [10] Sezer H., AA 6082-T6 Alaşımında Farklı Aşındırıcıların Katı Partikül Erozyonu,Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2017, 511185.
- [11] Dye D., Hunziker O., Roberts S. M., Reed R. C., Modeling of The Mechanical Effects Induced By The Tungsten Inert-Gas Welding of The IN718 Superalloy, *Metallurgical and Materials Transactions*, 2001, **7**(32), 1713–1725.
- [12] Huang X., Chaturvedi M. C., Richards N. L., Effect Of Homogenization Heat Treatment On The Microstructure and Heat- Affected Zone Microfissuring In Welded Cast Alloy 718, *Metallurgical and Materials Transactions*, 1996, **3**(27), 785–790.
- [13] Klotz T., Delbergue D., Bocher P., Levesque M., Brochu M., Surface Characteristics And Fatigue Behavior of Shot Peened Inconel 718, *International Journal of Fatigue*, 2018, **110**, 10-21.

- [14] Timet Titanyum metal & medical, <http://www.timet.com.tr/inkonel.asp>, (Ziyaret Tarihi: 20 Kasım 2018).
- Zafar S., Bansal A., Sharma A., Arora N., Ramesh C., Dry erosion wear performance of Inconel 718 microwave clad, *Surface Engineering*, 2014, **30**, 852-859.
- [15] Wang P.-z., He Z.-s., Yuan-xi Z., Shu-sen Z., Control of Grinding Surface Residual Stress of Inconel 718, *Procedia Engineering*, 2017, **174**, 504-511.
- [16] Ruff A. W., Lewis K. I., Measurement of Solid Particle Velocity in Erosive Wear, *Wear*, 1975, **1**(35), 195-199.
- [17] Chamanfar A., Monajati H., Rosenbaum A., Jahazi M., Bonakdar A., Morin E., Microstructure and Mechanical Properties Of Surface And Subsurface Layers In Broached And Shot-Peened Inconel 718 Gas Turbine Disc Fir Trees, *Materials Characterization*, 2017, **132**, 53-68.
- [18] Dehmas M., Lacaze J., Niang A., Viguier B., Study of High-Temperature Precipitation of Delta Phase in Inconel 718 Alloy, *Advances in Materials Science and Engineering*, DOI:10.1155/2011/940634.
- [19] Refrakter nedir?, <http://www.glasstechrefractory.com/blog/refrakter-nedir>, (Ziyaret Tarihi: 15 Nisan 2018).
- [20] Yasemin Y., 3003 H14 Alüminyum Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342538.
- [21] Fetaş Metalurji, <http://fetasmetalurji.com>. (Ziyaret Tarihi: 25 Temmuz 2018).
- [22] Shot peening (Bilyalı Dövme) nedir/ Sigma Shot Peening Sistemleri, İstanbul, <http://www.sspst.com/icerik/goTo/5/shot-peening-bilyali-dovme-nedir.html>, (Ziyaret Tarihi: 1 Kasım 2018).
- [23] Çulha A., Fidan S., Sınmazçelik T., Effect of Shot Peening Parameters on Surface Roughness of Inconel 718, *2nd International Conference On Tribology Turkeytrib'18*, İstanbul, Türkiye, 18-20 Nisan 2018.
- [24]

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Çulha A., Fidan S., Sınmazçelik T., Effect of Shot Peening Parameters on Surface Roughness of Inconel 718, *2nd International Conference On Tribology Turkeytrib'18*, İstanbul, Türkiye, 18-20 Nisan 2018.

Çulha A., Fidan S., Sınmazçelik T., Erosive Wear Behaviour of Shot Peened Inconel 718, *2nd International Conference On Tribology Turkeytrib'18*, İstanbul, Türkiye, 18-20 Nisan 2018.



ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Samsun'da doğdu. İlkokulu Samsun'da, ortaokulu Samsun ve Zonguldak'ta okudu. Lise öğrenimini Balıkesir Çok Programlı Astsubay Hazırlama Okulu Motor Bölümü'nde tamamladı. Kara Havacılık Okulu'ndan 2001 yılında Uçak Helikopter Teknisyeni olarak mezun oldu. 2001 yılında başladığı Anadolu Üniversitesi Çalışma Ekonomisi ve Endüstri İlişkiler Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu. 2001-2009 yılları arasında helikopter teknisyeni olarak görev yaptı. 2009 yılında aldığı motor ihtisas kursundan sonra Pratt & Whitney: PT6T Twin-Pac, PW100 serisi ve General Electric: T700/CT7 türbinli motorlar üzerinde görev yaptı. 2012 yılında ATR Eğitim Merkezi (ATC), Toulouse, Fransa'da B1-T1 Teknisyen Mekanik Kursu ve Motor Çalıştırma Kursu aldı. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2017 yılından itibaren Deniz Hava Eğitim Merkezi Komutanlığı bünyesinde Türbinli Motor Öğretmenliği yapmaktadır.