

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AISI 1060 ÇELİĞİNİN EROZİF AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. V. Erduran ERDEM

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı: Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof.Dr. M. Kelami ŞEŞEN

ŞUBAT 2006

**AISI 1060 ÇELİĞİNİN EROZİF AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. V. Erduran ERDEM
(506031211)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Şubat 2006**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. M. Kelami ŞEŞEN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Hüseyin Çimenoglu (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)**

ŞUBAT 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, aşınma türleri içinden, özellikle 1970li yıllardan sonra üzerinde araştırmalar yapılmaya başlanmış olan erozif aşınmadan bahsedilmiştir. Malzemeye, aşındırıcı parçacıklara ve çalışma koşullarına bağlı birçok farklı parametreye sahip olup, tüm aşınma koşullarını içeren bir modelleme geliştirilemeyen bu aşınma türünün bağlı olduğu parametreleri ve de ısıt işlemler ile geliştirilebilme imkanını incelemek amacıyla yüksek karbonlu AISI 1060 çeliğine farklı ısıt işlemler yaparak erozif aşınma deneyleri yapılmış, ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla uzun yıllardır piyasada aşınmaya dirençli ticari plaka olarak bulunan HARDOX400 ve HARDOX500 çelikleri de erozif aşınma dirençleri bakımından incelenmişlerdir. Bu çalışmadaki ısıt işlemler, sertlik ölçümleri, erozif aşınma deneyleri ve de aşınmış numunelerin SEM çalışmaları İ.T.Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin metalografik incelemeleri Uzel Makina San.A.Ş.'de, AISI 1060 çeliğinin numune kesim işlemleri Şeker Doğrama Ltd.Şti.'de, HARDOX çeliklerinin lazer kesimleri As-Bilek San.Ltd.Şti.'de yapılmıştır.

Çalışmamın şekillenmesi ve de sonuçlanmasında, değerli fikir ve tecrübeleriyle beni yönlendiren ve gerekli çalışma imkanlarını sağlayan tez danışmanım sayın Prof. Dr. M. Kelami ŞEŞEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında özellikle deneysel çalışmalarda aktif olarak yardımda bulunan ve her konuda fikir ve tecrübesiyle beni yönlendiren Araş. Gör. C. Fahir Arısoy'a ve çalışmamın şekillenmesinde içerik açısından beni yönlendirip önerilerde bulunan ve metalografik incelemeler konusunda bana yardımcı olan Met.Yük.Müh. Gökhan Başman'a sonsuz teşekkür ederim. Çalışmamla ilgili çeşitli yardımlarından dolayı Met.Yük.Müh. Cüneyt Gürcan'a, Araş. Gör. Ahmet Öztürk'e, sertlik ölçümlerinden dolayı teknisyen Mızrap Canıbeyaz'a ve SEM çalışmalarından dolayı fizikçi Çiğdem Çakır'a da teşekkür ederim.

Son olarak, tüm eğitim hayatım boyunca maddi manevi her konuda bana destek olan aileme en derinden teşekkürü bir borç bilirim.

Şubat 2006

Met. Müh. V. Erduran ERDEM

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR TABLO LİSTESİ

iv

Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİL LİSTESİ

Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SEMBOL LİSTESİ

ix

ÖZET

Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SUMMARY

Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

1. GİRİŞ	1
1.1 Aşınma	1
1.2 Aşınma Türleri	3
1.2.1 Abrazif Aşınma	3
1.2.2 Parlatma Aşınması	4
1.2.3 Katı Parçacık Erozyonu	4
1.2.4 Kavitasyon Erozyonu	4
1.2.5 Sıvı Çarpma Erozyonu	5
1.2.6 Sulu Çamur Erozyonu	5
1.2.7 Kayma Aşınması	5
1.2.8 Adhezif Aşınma	5
1.2.9 Sürtme Aşınması	6
1.2.10 Yuvarlanma Teması Aşınması	6
1.2.11 Darbe Aşınması	6
1.2.12 Korozyon Aşınma	6
1.2.13 Oksidasyon Aşınması	7
1.2.14 Yorulma Aşınması	7
2. EROZİF AŞINMA	8
2.1 Tanımı	8
2.2 Mekanizmaları	8
2.3 Sıvı ile Erozyon Aşınma	15
2.4 Malzemelerin Erozyon Aşınma Dirençleri	17
2.4.1 Çeliklerin Erozyon Aşınma Dirençleri	19
2.4.2 Polimerlerin Erozyon Aşınma Dirençleri	21
2.4.3 Seramiklerin ve Sermetlerin Erozyon Aşınması	21
2.5 Görüldüğü Yerler	22
2.5.1 Türbin Kanatları	22
2.5.2 Buhar Kazanları	24

2.5.3	Uçak Motorları	24
2.5.4	Sondaj Cihazları	25
2.5.5	Pompalar	25
2.5.6	Valfler	26
2.5.7	Kömür Pulverize Değirmeni	27
2.5.8	Kimya-Gıda Sanayii	27
2.5.9	Maden İşleri	28
3.	ÇELİKLERİN AŞINMA DİRENCİNİ ARTTIRICI İŞLEMLER	29
3.1	Çeliklerde Yüzey Sertleştirme	29
3.1.1	Difüzyonla Yüzey Sertleştirme Yöntemleri	31
3.1.2	Tercihli Yüzey Sertleştirme Yöntemleri	37
3.1.3	Difüzyon ve Tercihli Sertleştirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması	39
3.1.4	Termal Sprey Kaplamalar	40
3.1.5	Elektrolizle Kaplama	47
3.1.6	PVD ve CVD Kaplama	51
3.2	Klasik Isıl İşlemler İle Çeliklerin Sertleştirilmesi	53
3.2.1	Fe-C Faz Diyagramı	53
3.2.2	Sertleştirme İşlemi	55
3.2.3	Temperleme İşlemi	57
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	59
4.1	Kullanılan Malzeme ve Cihazlar	59
4.1.1	Kullanılan Çelik Malzemeler	59
4.1.2	Kullanılan Aşındırıcı Parçacıklar	61
4.1.3	Deney Düzeneği	62
4.2	Deneylerin Yapılması	63
4.2.1	Isıl İşlem Çalışmaları	63
4.2.2	Erozif Aşınma Deneyleri	64
5.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	66
5.1	Isıl İşlem Sonrası Malzeme Karakterizasyonu	66
5.1.1	Sertlik Değerleri	66
5.1.2	Darbe Enerjileri	67
5.1.3	Mikroyapı İncelemeleri	68
5.2	Aşınma Deneylerinin Sonuçları	70
5.2.1	Malzeme Sertliğine Göre Aşınma Miktarları	70
5.2.2	Parçacık Çarpma Hızının Erozif Aşınmaya Etkisi	71
5.2.3	Parçacık Çarpma Açısının Erozif Aşınmaya Etkisi	72
5.2.4	Aşındırıcı Parçacık Türünün Erozif Aşınmaya Etkisi	74
5.2.5	Aşınmış Yüzeylerin SEM ile İncelenmesi	75
5.3	Tüm Malzemelerin Aşınma Miktarlarının Karşılaştırılması	78
5.4	Değerlendirme	80
5.5	Genel Sonuçlar	81
	KAYNAKLAR	83
	EKLER	86
	ÖZGEÇMİŞ	90

KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
HVOF	: Hypersonic Velocity Oxygen Fuel
PVD	: Physical Vapour Deposition
CVD	: Chemical Vapour Deposition
HRC	: Hardness Rockwell C
OFW	: Oxyfuel Wire
EAW	: Electrical Arc Wire
OFP	: Oxyfuel Powder
PA	: Plasma Arc
CEV	: Carbon Equivalent
SEM	: Scanning Electron Microscope
1060N	: Normalleştirilmiş 1060 çeliği
1060Y	: Yumuşatılmış 1060 çeliği
1060S	: Su verilmiş 1060 çeliği
1060T4	: Su verilip 450°C’de temperlenmiş 1060 çeliği
1060T5	: Su verilip 550°C’de temperlenmiş 1060 çeliği
1060T6	: Su verilip 650°C’de temperlenmiş 1060 çeliği
H400	: HARDOX400 çeliği
H500	: HARDOX500 çeliği

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1: Aşınma kontrolü için genel malzeme seçim rehberi.....	1
Tablo 2.1: Metaller polimerler ve seramiklerin erozif aşınma dayanımları açısından karşılaştırılmaları.....	19
Tablo 2.2: Dövme 12Cr çeliği buhar türbin kanadının erozif aşınma direncinin difüzyon işlemi ile değişimi.....	23
Tablo 3.1: Yüzey sertleştirme yöntemleri.....	30
Tablo 3.2: Difüzyon işlemlerinin temel özellikleri.....	32
Tablo 3.3: En yaygın beş yüzey sertleştirme işleminin karşılaştırmalı faydaları.....	40
Tablo 3.4: Sürtünme ve aşınma uygulamaları için termal sprey uygulamaları.....	46
Tablo 3.5: Önemli metalurjik fazlar ve mikroçerikler.....	55
Tablo 4.1: Çalışmalarda kullanılan çelik malzemelerin kimyasal bileşimleri ve karbon eşdeğerleri.....	60
Tablo 4.2: Çalışmalarda kullanılan çelik malzemelerin mekanik özellikleri.....	60
Tablo 4.3: Bu çalışmada uygulanmış deney koşulları.....	65
Tablo 5.1: Dört farklı malzemenin darbe enerjileri ve sertlik değerleri.....	67
Tablo A.1: Normalleştirilmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri.....	86
Tablo A.2: Yumuşatılmış 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri.....	86
Tablo A.3: Sertleştirilmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri.....	86
Tablo A.4: 450°C’de temperlenmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri.....	86
Tablo A.5: 550°C’de temperlenmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri.....	87
Tablo A.6: 650°C’de temperlenmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri.....	87
Tablo A.7: HARDOX400 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri...	87
Tablo A.8: HARDOX500 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri...	87
Tablo B.1: Sertlik dönüşüm tablosu.....	88

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1: Çalışma koşulları ve aşınma türü arasındaki ilişkiyi belirten akış çizelgesi	2
Şekil 2.1: Bilinen erozif aşınma mekanizmaları.....	9
Şekil 2.2: Çarpma açısı ve hızı.	9
Şekil 2.3: Sünek ve kırılğan malzemeler için parçacık çarpma açısı ile aşınma hızının ilişkisi	11
Şekil 2.4: 127µm SiC parçacıkları ile 152ms ⁻¹ hızda aşındırılmış 1100-0 alüminyum ve de alüminanın karşılaştırılması.....	11
Şekil 2.5: Farklı malzemeler için küçük ve büyük parçacık kullanımına ve açığa bağlı olarak erozif aşınma hızları.	13
Şekil 2.6: Katı yüzey üzerine sıvı çarpması ile erozyon mekanizması.....	15
Şekil 2.7: Malzeme sertliğinin bir fonksiyonu olarak, 15° ve 90° için farklı sertlikteki değişik metallerin erozif aşınma dirençleri.	17
Şekil 2.8: Çok sert ve çok elastik malzemelerin zıt aşınma koruma mekanizmaları.....	18
Şekil 3.1: Değişik difüzyon prosesleri için kullanılan çelik türleri	31
Şekil 3.2: Belirli difüzyon prosesleri ile çeliklerde elde edilebilen sertlik aralıkları.....	33
Şekil 3.3: Tipik kaplama kalınlığına göre difüzyon proseslerinin sınıflandırılması.....	33
Şekil 3.4: Fe-C denge diyagramı.	54
Şekil 3.5: 816°C’de ostenitlenmiş SAE1060 çeliği için eşsıcaklık dönüşüm diyagramı	56
Şekil 3.6: SAE1060 çeliğinin temperleme sıcaklığına bağlı olarak sertliğinde meydana gelen değişim	57
Şekil 3.7: SAE1060 çeliğinin temperleme sıcaklığına bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişimler	58
Şekil 4.1: HARDOX400’ün ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.	60
Şekil 4.2: HARDOX500’ün ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.	60
Şekil 4.3: AISI1060’ın ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.	61
Şekil 4.4: Bu çalışmada kullanılan Al ₂ O ₃ parçacıklarının SEM görüntüsü.....	61
Şekil 4.5: Bu çalışmada kullanılan martenzitik çelik gritlerin SEM görüntüsü	62

Şekil 4.6: Erozif aşınma deney düzeneği.....	63
Şekil 5.1: AISI1060 çeliğine yapılan ısıt işlemlerin sertlik değerine etkileri.....	67
Şekil 5.2: Yumuşatılmış AISI1060 çeliğinin ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri	68
Şekil 5.3: Su verilmiş AISI1060 çeliğinin ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri	68
Şekil 5.4: 450°C’de temperlenmiş AISI1060 çeliğinin ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri	69
Şekil 5.5: 550°C’de temperlenmiş AISI1060 çeliğinin ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri	69
Şekil 5.6: 650°C’de temperlenmiş AISI1060 çeliğinin ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri	70
Şekil 5.7: Malzemelerin 90°’deki erozif aşınma dirençlerinin sertliklerine göre sıralanmaları	71
Şekil 5.8: Malzemelerin 30°’deki erozif aşınma dirençlerinin sertliklerine göre sıralanmaları	71
Şekil 5.9: Aşındırıcı parçacığın çarpma hızına bağlı olarak erozif aşınma miktarındaki değişim	72
Şekil 5.10: Parçacık açısına bağlı olarak malzemelerin erozif aşınma dirençlerinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 5.11: AISI1060 çeliğinin erozif aşınma direncinin parçacık çarpma açılarına göre değişimi	73
Şekil 5.12a-b: AISI1060 çeliğinin erozif aşınma direncinin parçacık türüne göre, 30° ve 90°’de değişimi.....	75
Şekil 5.13: Sertleştirilmiş AISI1060 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri.....	76
Şekil 5.14: 550°C’de temperlenmiş AISI1060 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri	76
Şekil 5.15: Yumuşatılmış AISI1060 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri.....	77
Şekil 5.16: HARDOX400 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri	77
Şekil 5.17: Normalleştirilmiş 1060 AISI1060 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri	78
Şekil 5.18: Malzemelerin 90° çarpma açısındaki bağıl erozif aşınma miktarları	79
Şekil 5.19: Malzemelerin 30° çarpma açısındaki bağıl erozif aşınma miktarları	79

SEMBOL LİSTESİ

HV	: Vickers sertliği
HK	: Knoop sertliği
HB	: Brinell sertliği
HRA	: Rockwell A sertliği
HRB	: Rockwell B sertliği
HRC	: Rockwell C sertliği
m	: Kütle (gram)
t	: Süre (saniye)
V	: Hız (metre/saniye)

AISI 1060 ÇELİĞİNİN EROZİF AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Aşınma, birçok mühendislik malzemesinde görülen, istenmeyen bir malzeme kaybıdır. ASTM G40-02 standardına göre aşınma: katı bir yüzeyde, yüzey ile temas eden parça veya parçacıklar arasındaki bağıl harekete bağlı olarak oluşan, genellikle sürekli malzeme kaybını içeren hasardır. Aşınma temel olarak abrazif, erozif, adhezif ve yorulma aşınması olarak dört ana kategoriye ayrılabilir.

Bu çalışmanın temel konusu olan erozif aşınma, katı bir yüzeye parçacıkların tekrarlı çarpması sonucu yüzeyden malzeme kaybı şeklinde görülen bir aşınma türüdür. Uçak motorları, mineral çamurları işleme sistemleri, buhar kazanları, sondaj cihazları, valfler gibi çeşitli parçalarda görülür. Erozif aşınma, parçacık türü, açısı, hızı, boyutu, malzeme sertliği, tokluğu gibi birçok parametreye bağlıdır. Malzemeler erozif aşınma davranışlarına bağlı olarak sünek veya kırılgan karakter gösterirler. Sünek malzemeler daha çok 30° gibi eğik açılarda aşınırken, kırılgan malzemeler 90° gibi dik açılarda aşınırlar. Metaller ve seramiklerin erozif aşınma dirençlerindeki en temel fark budur. Çeliklerin erozif aşınma davranışı ile ilgili literatür, sünek bir çeliğin aşınmaya daha çok dayanıklı olduğunu önerir.

Çeliklerin aşınma direncini arttırmak için çeşitli yöntemler uygulanır. Bunları temel olarak yüzey sertleştirme ve ısıtılma işlemi ile tüm yapıyı sertleştirme olarak ikiye ayırabiliriz. Yüzey sertleştirme yöntemleri de kendi içlerinde ikiye ayrılırlar. İlk grupta hardfacing ve kaplama gibi yüzeye ek bir tabaka ekleyen yüzey sertleştirme yöntemleri vardır. İkinci grupta ise, difüzyonla (karbürleme, nitrüleme, borlama vs.) ve tercihli sertleştirme (alevle, endüksiyonla, lazerle vs.) yöntemleriyle yüzey sertleştirme bulunur. Yüzey sertleştirme işleminin dışındaki ikinci yöntem olan tüm yapıyı sertleştirme için klasik ısıtılma işlemleri kullanılır. Çelik ostenit sıcaklığının

üzerine çıkartılarak ısıtılma maruz bırakılır ve su verme ile martenzitik yapı elde edilir. Sonrasında temperleme işlemi yapılarak yapının kırılabilirliği azaltılabilir.

Bu çalışmada Erdemir tarafından üretilen yüksek karbonlu, alaşımsız AISI1060 çeliği, orijinal ve de ısıtılma işlemleri geliştirilmiş haliyle kum püskürtme metodu ile erozif aşınma deneylerine sokulmuş, ayrıca bir kıyaslama yapabilmek amacı ile ticari aşınma plakaları olarak piyasada bulunan HARDOX400 ve HARDOX500 çelikleri de erozif aşınma deneylerine sokulmuşlardır.

Yapılan çalışmalar sonucunda 90° dik çarpma açısında, yumuşatılmış AISI1060 çeliğinin en yüksek erozif aşınma direnci gösterdiği, 30° eğik çarpma durumunda ise HARDOX500 çeliğinin, onu da takiben sertleştirilmiş AISI1060 çeliğinin en yüksek direnci gösterdiği görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar, literatürdeki dik çarpma durumunda sünek malzemelerin daha yüksek direnç, eğik çarpma durumunda ise sert malzemelerin daha yüksek direnç göstereceği bilgisiyle uyumludurlar.

Ayrıca bu çalışma içinde erozif aşınmaya etki eden parametreler detaylı olarak incelenmiş ve çarpma açısı, çarpma hızı, malzeme sertliği ve parçacık sertliği-boyutuna bağlı olarak incelemeler yapılmıştır.

INVESTIGATING AND IMPROVING THE EROSION WEAR PROPERTIES OF AISI 1060 STEEL

SUMMARY

Wear is an undesirable material loss which is seen in many engineering materials. According to the ASTM G40-02 standard, wear is the damage to a solid surface, usually involving progressive loss of material, due to relative motion between that surface and a contacting substance or substances. Wear can be split into four main categories as: abrasive, erosive, adhesive and fatigue wear.

The main subject of this work, erosive wear, is the loss of material from a solid surface, because of repeating impingement of particles. It can be seen in many different applications such as aircraft engines, mineral slurry systems, steam boilers, drilling tools and valves. Erosive wear is related to many parameters like particle type, angle, speed, size, material hardness and toughness. Materials show either ductile or brittle character according to their erosive wear behaviour. Ductile materials erode mostly at 30° of impingement angles while brittle materials erode mostly at 90°. This is the main difference between the erosive wear resistance of metals and ceramics. The previous works about the erosive wear behaviour of steels suggest that a ductile steel is more resistant to erosive wear.

Different methods are applied for improving the wear resistance of steels. They are mainly divided into two groups. First one is surface hardening, second one is through hardening with heat treatment. Surface hardening methods are also divided into two. In the first group there is hardfacing and coating, which both add layers to the substrate. In the second group, there is diffusion (carburizing, nitriding, boriding etc.) and selective hardening methods (flame, induction, laser etc.). In the second method of improving wear resistance, conventional heat treatment is used. Steel is heat treated by heating to high temperatures that austenite is formed, then quenching and

having martensite structure. After quenching, steel can be tempered to reduce its brittle behaviour.

In this study, a high carbon, non-alloy steel, AISI 1060, which is produced by Erdemir is put into erosive wear tests in its original and heat treatment forms, by sand blasting method, and with a purpose of comparing, HARDOX400 and HARDOX500 commercial wear plates are also tested.

In the results, it has been founded that, softened AISI 1060 steel showed the highest erosive wear resistance in 90° of impingment angle while HARDOX500 showed the highest in 30°, followed by the hardened AISI 1060. This results are well suited with the knowledge from previous works which tell that in normal angles hard steels show better resistance while in shallow angles ductile steels show better resistance.

Also in this study, the parameters effecting the erosive wear are investigated in details. Different impingment angles, particle speeds, material hardnesses, particle hardnesses and particle sizes are used and compared for understanding the mechanisms of erosive wear.

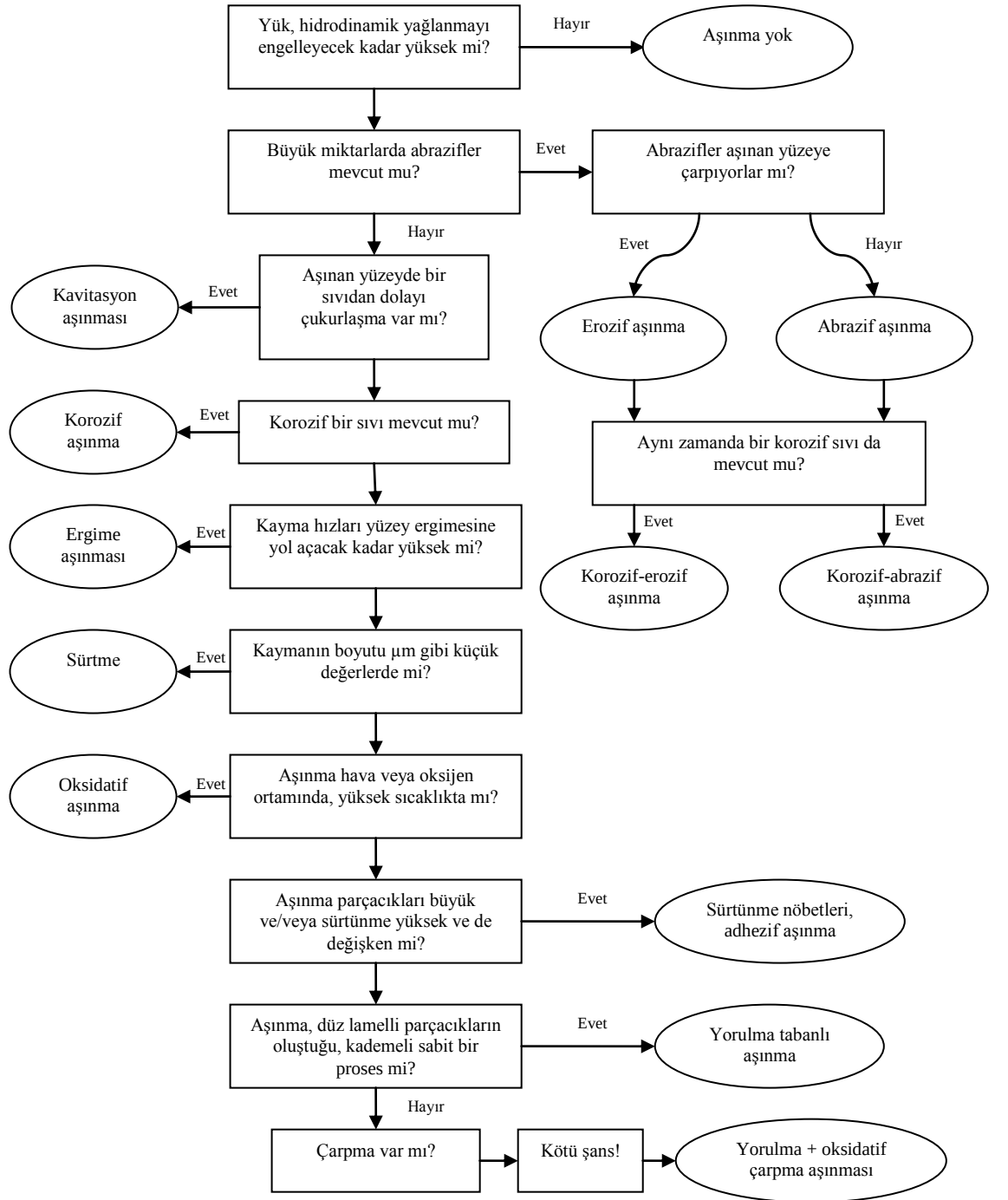
1. GİRİŞ

1.1 Aşınma

Aşınma, birçok mühendislik malzemesinde görülen, istenmeyen bir malzeme kaybıdır. ASTM G40-02 standardına göre aşınma: katı bir yüzeyde, yüzey ile temas eden parça veya parçacıklar arasındaki bağıl harekete bağlı olarak oluşan, genellikle sürekli malzeme kaybını içeren hasardır [1]. Aşınmada kullanılan bilimsel ölçü hacim kaybıdır [2]. Aşınma temel olarak dört ana kategoriye ayrılabilir. Bunlar abrazif aşınma, erozif aşınma, adhezif aşınma ve de yüzey yorulması ile meydana gelen aşınmadır [3]. Bu kategoriler de kendi içlerinde farklı türlere ayrılırlar. Aşınmanın bir ülkenin ekonomisine yaptığı zarar çok büyüktür. 18. yüzyıl gibi eski zamanlarda bile bu konuda bilinçlenme başlamıştır ve de İngiltere’de yapılan bir çalışmaya göre, o dönemde at arabalarında rulman kullanılması sayesinde o dönemin parası ile yıllık yaklaşık 1 milyon sterlin tasarruf edileceği hesaplanmıştır [4]. Çalışma koşullarına göre meydana gelmesi beklenen aşınma türünü gösteren bir şema Şekil 1.1’de verilmiştir. Beklenen aşınma türüne göre, uygun bir malzeme seçmek konusunda yardımcı olabilecek bir rehber de Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1: Aşınma kontrolü için genel malzeme seçim rehberi. [4]

Malzeme özelliği	Aşınma mekanizması							
	Abrazif	Erozif	Kavitasyon	Korozif	Sürtme	Adhezif	Ergime	Yorulma
Sertlik	●	●	○	○	○	●	○	○
Tokluk	○	●	●	○	○	○	○	●
Yorulma direnci	●	●	●	○	●	○	○	●
İnertlik	○	○	○	●	● ¹	○	○	○
Yüksek ergime sıcaklığı	○	○	○	○	○	●	●	○
Heterojen mikroyapı	●	○	○	x ²	○	●	○	○
Metal dışı karakter	○	○	○	●	○	●	○	○
●	Önemli							
○	Önemsiz							
x	İstenmez							
¹	Metaller için havada sürtme							
²	Homojen mikroyapı elektrokimyasal korozyonu ve buna bağlı olarak birçok korozif aşınma şeklini engeller							



Şekil 1.1: Çalışma koşulları ve aşınma türü arasındaki ilişkiyi belirten akış çizelgesi. [4]

Farklı tasarım parametreleri aşınma hızını değişik yönlerde etkilerler. Aşınma hızını azaltmak için dört temel yöntem vardır. Bunlar:

- Yüzeyi geliştirerek aşınmaya daha dirençli yapmak,
- Aşınmaya daha dirençli malzeme kullanmak,
- Yüzeyler arasındaki mesafeyi arttırmak,
- Temasın şiddetini azaltmak,

olarak maddelenebilir [2].

1.2 Aşınma Türleri

ASTM'nin standartlarına göre tanımlanmış aşınma türlerinden aşağıda kısaca bahsedilmiştir. Bu türlerin hepsi birbirinden tamamen bağımsız değildir ve kimileri birbiri ile ortak mekanizmalara sahiptir. Örneğin parlatma aşınması, abrazif aşınma temellidir. Katı parçacık erozyonu, sıvı çarpma erozyonu, kavitasyon erozyonu ve de sulu çamur erozyonu, erozif aşınma olarak ana bir kategoride toplanabilirler. Özellikle katı parçacık ve sulu çamur erozyonunun mekanizmaları birbirlerine çok yakındır. Kavitasyon erozyonu ile sıvı çarpma erozyonu arasındaki fark da, tespit edilmesi oldukça zor bir farktır.

1.2.1 Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, ASTM'nin tanımına göre, sert parçacıkların veya çıkıntıların, katı bir yüzeye bastırılıp ilerlemeleri sonucu oluşur [1]. Aşınma, yüzey ile temasta bulunan cisim veya cisimler arasındaki bağıl hareketlere bağlı olarak, genellikle ilerleyen malzeme kaybını içeren katı yüzey hasarıdır [5]. Abrazif aşınma, katı bir objeye, kendisi ile eşit veya daha yüksek sertliğe sahip malzemeler tarafından kuvvet uygulanması durumunda oluşur [4].

Abrazif aşınmanın maliyeti yüksektir ve de bir sanayi toplumunun gayri safi milli hasılasının %1 ile %4'ü kadar bir değere denk gelmektedir. Abrazif aşınmanın etkisi madencilik, mineral işleme, tarım, toprak taşıma ve genel olarak kum, taş ve minerallerin bulunduğu her yerde çok bellidir. Temel örnekleri: cevher yükleme/taşıma kovaları, kırıcılar, kamyon damperleridir ve pulluklardır [5].

1.2.2 Parlatma Aşınması

“Parlatma aşınması” terimi, ikisinin de yüzeyinden malzeme kaybı olup, en azından birinin yüzeyinde parlamış bir yüzeyin oluştuğu iki katı arasındaki etkileşimi tarif etmek için kullanılır. Fakat “parlak” denilen yüzey durumu kantitatif olarak tanımlanamadığı için bu aşınma tanımı da kesin olamamaktadır. Parlaklık terimi, bir yüzeyin ışığı güçlü bir şekilde yansıtabilmesi ve uzaktaki nesnelerin görüntülerini bir ayna gibi temiz şekilde gösterebilmesi şeklinde tanımlanabilir. Abrasif aşınma mekanizmalarına sahip olan bir aşınma türüdür [5].

1.2.3 Katı Parçacık Erozyonu

Katı parçacık erozyonu, küçük, katı parçacıkların tekrarlı darbeleri sonucu oluşan malzeme kaybıdır [1]. Kimi uygulamalarda katı parçacık erozyonu faydalı bir durumdur, kumlama ve hızlı abrasif sujeti kesimi gibi. Fakat bir çok mühendislik sisteminde önemli bir problemdir. Bunlara buhar ve jet türbinleri, parçacıklı maddeler taşıyan boru hatları-valfler ve akışkan yatak yanma sistemleri örnek verilebilir [5].

1.2.4 Kaviteasyon Erozyonu

Kaviteasyon, sıvı mekanikçileri ve fizikçiler tarafından, bir sıvı içinde kavitelerin veya kabarcıkların tekrarlanan çekirdeklenme, büyüme ve şiddetli çarpmaları olarak tanımlanır. Kaviteasyon erozyonu ise, sıvılardaki kabarcıklar yüzünden malzemelerin mekanik olarak bozulmasıdır. Kabarcıkların yüzeyde veya yüzeye yakın yerlerde patlamaları sayesinde, katı yüzeyde mekanik bir yük oluşur. Bu patlamalar direk olarak yüzeye yönelmiş sıvı mikrojetlere sebep olur. Mekanik yükler tamamen yereldir ve küçük kabarcıkların konsantre bir şekilde patlamalarından dolayı fazlasıyla şiddetlidirler, dolayısıyla yüzeyde deformasyona neden olurlar. Tekrarlı yükleme ise, yüzeyden malzeme kaybına, yani erozyona yol açar [5].

Kaviteasyon aşınması, sıcak buhar ortamında çalışan pervaneler, türbin kanatları gibi parçalarda ve de valf gövdelerinde gözükür. Aşınma, kaviteasyona maruz kalan yüzeyde delikler veya çukurların oluşması şeklinde gelişir. Pervane gibi parçaların çalışması, kaviteasyon hasarı yüzünden oluşan titreşimler yüzünden engellenebilir [4].

1.2.5 Sıvı Çarpma Erozyonu

Sıvı çarpma erozyonu, katı bir yüzeye devamlı bir şekilde sıvı damlası çarpması sonucu katı yüzeyde oluşan sürekli malzeme kaybıdır [1]. Bu tanımın dışında kalan erozyon mekanizmaları, sürekli püsküren sıvı akıma, kavitasyon oluşturan akıma veya katı parçacıklar taşıyan sıvı akıma bağlı oluşan erozyon mekanizmalarıdır. Kesintili sıvı darbelerinin önemi, katı hedef üzerinde, sabit sıvı akımına göre çok daha yüksek temas basınçları oluşturmalarıdır. Buna bağlı olarak, malzemenin dayanıklılık sınırı, hatta akma mukavemeti bile kolayca aşılabılır ve malzemede mekanik hasar meydana gelebilir. Yeterince yüksek hızlarda, tek bir damla ile bile malzeme kaybı olabilir. Bu erozyon tipinin en temel örnekleri nemli buhar ortamında çalışan buhar türbini kanatçıklarında ve de yağmurdan geçen uçak, roket gibi uçan nesnelerde gözükür [5].

1.2.6 Sulu Çamur Erozyonu

Sulu çamur (slurry), kolayca pompalanabilecek bir kıvamda, bir sıvı (genelde su) ile katı parçacıkların karışımıdır. Sulu çamur erozyonu ise, bir malzemenin yüksek hızda sulu çamur akıntısına maruz bırakılması sonucu oluşan aşınma veya malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Bu erozyon, hem malzemenin çamurun içinden geçmesi durumunda hem de çamurun malzemenin üzerinden geçmesi durumunda görülür [5].

1.2.7 Kayma Aşınması

Kayma aşınması, temas eden iki katı gövdenin birbirleri ile aynı düzlem üzerinde kaymaları sonucu oluşan bir aşınma türüdür [1].

1.2.8 Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, temas eden iki katı gövdenin yerel yapışmalarından dolayı ortaya çıkan, iki yüzey arasında malzeme transferi veya malzeme kaybına neden olan bir aşınma türüdür [1]. Eğer hiçbir abrazif parça mevcut değilse, kaymanın büyüklüğü sürtmeden daha büyükse ve de malzeme kaybı hızı oksidasyon prensipleri tarafından kontrol edilmiyorsa, adhezif aşınmanın olduğu söylenir [5].

1.2.9 Sürtme Aşınması

Sürtme, temas eden yüzeylerin arasında oluşan düşük şiddetli titreşimli hareketlerdir [1]. Bu hareketin normal atmosferik koşullarında olmasının ani bir sonucu, oksit tabakalarının oluşumudur, bu yüzden sürtme aşınması teriminin yanında sürtme korozyonu da kullanılır. Sürtme hareketinin en temel nedenlerinden biri titreşim olduğu için, sürtme daha çok hareketli makinelerde görülür [5].

1.2.10 Yuvarlanma Teması Aşınması

Yuvarlanma teması aşınması bir gövde üzerinde yuvarlanan başka bir gövdenin yüzeyinin tekrarlı mekanik gerilimlere maruz kalması sonucu oluşur. Aşınma yuvarlanan yüzeyde de, üzerinde yuvarlanılan yüzeyde de görülebilir. Yuvarlanma teması aşınması, yuvarlanan elemanların yatakları, çark dişleri, tekerlek-ray temasları, silindir yatakları ve hadde merdanelerindeki sorunların temel nedenidir[5].

1.2.11 Darbe Aşınması

Darbe aşınması, bir katı yüzeyin, başka bir katı gövdenin tekrarlı dinamik teması olan vurmaya maruz kalması ile oluşur. Bu sınırlı tanım, sıvı fiskiyesi veya parçacık akışı ile oluşan erozif aşınmayı dışarıda tutar. Birçok endüstri, darbe aşınmasına neden olan işlemleri içerir. Makine parçaları, kamlar ve dişliler belirli bir dinamik bileşene maruz kalırlar. Tipik bir örnek, baskı makinelerindeki puntolardır. Şekillerini milyarlarca darbe döngüsü boyunca bozulmadan saklamaları beklenir [5].

1.2.12 Koroziyon Aşınma

Koroziyon aşınma, malzemelerin hem korozyon hem de aşınma mekanizmalarını içeren bir sistemle bozulmaya uğramasıdır. Aşınma ve korozyonun birleşmiş etkileri, iki prosesin etkilerinin tek başlarına toplanmasından çok daha yüksektir. Bu da iki proses arasında bir sinerjiyi belirtir. Korozyon ve aşınma, madencilik, mineral işleme, kimyasal işleme ve enerji üretimi gibi sanayilerde birleşerek yüksek hasara sebep olurlar [5].

1.2.13 Oksidasyon Aşınması

Oksidasyon aşınması genellikle yağlanmamış kayma koşullarında gözükten bir aşınma türüdür. Kayma arayüzlerinin arasındaki temastan dolayı oluşan yüksek sıcaklıktaki bölgelerde 3-4µm kalınlığında oksit filmlerinin oluştuğu, genelde (ama her zaman değil) faydalı bir korozyon tipidir. Birçok durumda, tribolojik oksidasyon, metallerin aşınma hızını, inert atmosferdeki değerlerine göre azaltır. Fakat azaltma sadece oksit tabakaları kayma sırasında oluşuyorsa geçerlidir. Sabit fırın ortamlarında önoksitleme ile düşük aşınmalı yüzeyler elde etmek mümkün değildir [5].

1.2.14 Yorulma Aşınması

Yorulma aşınması, malzemedeki yorulma sonucu oluşan kırılmaya bağlı gelişen aşınmadır [1]. Bu aşınma türünde çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve kırılma görülür. Malzemeye tekrarlı olarak etki eden yüksek gerilmeler, yorulmanın oluşmasında etkilidir. Temel olarak, kayma, yuvarlanma ve darbe hareketlerine bağlı olarak malzemede yorulma aşınması görülebilir [4].

2. EROZİF AŞINMA

2.1 Tanımı

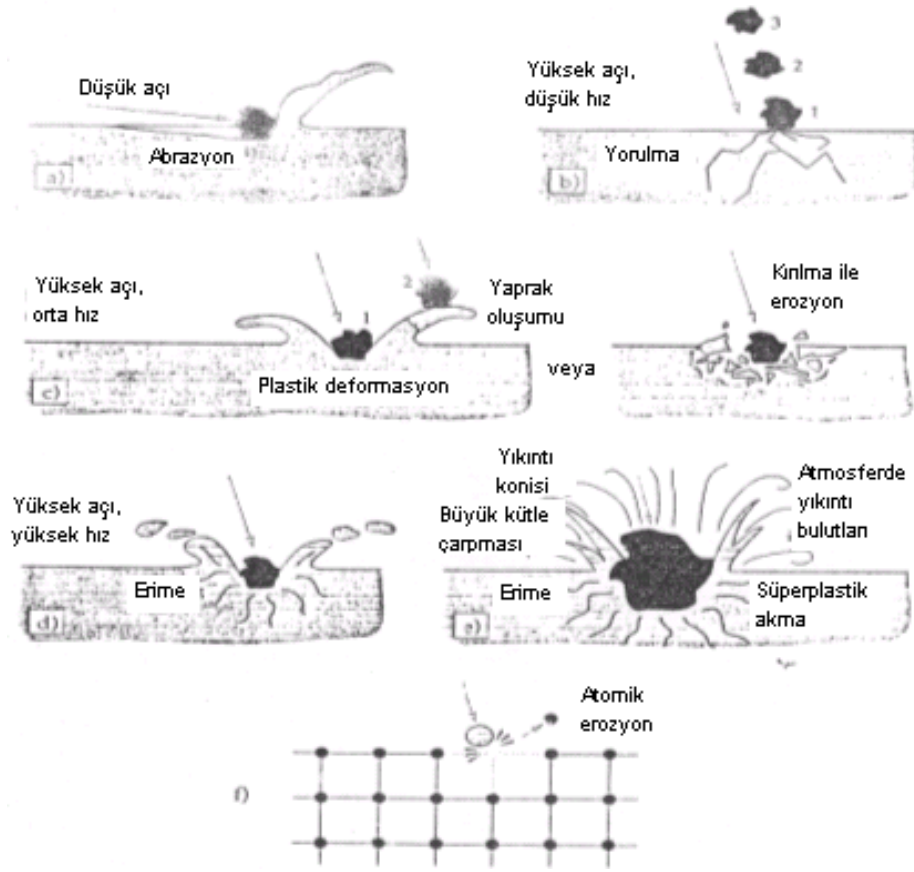
Erozyon, veya erozif aşınma, bir katının, katı parçacıklar taşıyan bir akışkan ile teması sırasındaki bağıl hareketlere bağlı olarak yüzeyinde oluşan malzeme kaybıdır [6]. Erozif aşınma çok çeşitli makinelerde görülür ve tipik örnekleri toz bulutundan geçen bir uçağın pervanelerindeki hasar ve mineral çamurları işleme sistemlerindeki pompa pervanelerindeki aşınmadır. Diğer aşınma şekillerinde de olduğu gibi, mekanik dayanım aşınma direncini garantilemez. Aşınmayı minimize etmek için detaylı bir malzeme karakteristiği çalışması gereklidir. Aşındırıcı parçacıkların da özellikleri önemlidir ve bu tip aşınmanın kontrolünde, artan bir şekilde, ilgili parametre olarak kabul edilmektedir [4].

Erozif aşınmaya karşı çözümler: hasar oluşumunu azaltmak için östenitik çelikler veya kromlama işleminin kullanılmasını, siklonlar veya elekler ile parçacıkların tutulmasını, kanatların plazma sprey veya difüzyon kaplama ile korunmasını ve türbin yapılarının tekrar tasarlanmasını içerir [5].

2.2 Mekanizmaları

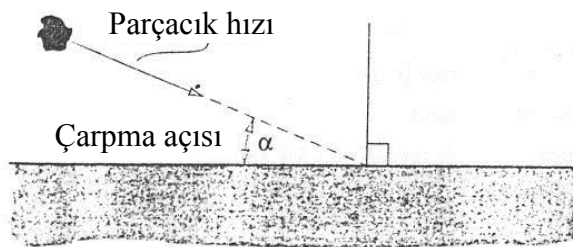
Erozif aşınma, parçacık malzemesi, çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık boyutu kontrollü birçok aşınma mekanizması içerir. Parçacık sert ve katı ise, abrazyon aşınmaya benzer bir davranış gözükür. Aşındırıcı parçacıklar sıvı olduğunda, abrazyon gözükmez ve aşınma mekanizmaları, darbe sonucu oluşan tekrarlı gerilmelerle ilgilidir [4].

“Erozif aşınma” terimi, küçük parçacıkların mekanik parçalara darbesi sonunca oluşan birçok mekanizmayı kapsar. Bu tanım, doğası gereği deneyseldir ve temel aşınma bilgileri yerine daha çok pratikteki incelemelere bağlıdır. Bilinen erozif aşınma mekanizmaları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Bilinen erozif aşınma mekanizmaları. [4]

Çarpma açısı, Şekil 2.2’de gözüktüğü gibi, aşınan yüzey ve parçacığın çarpma öncesi geliş doğrultusu arasındaki açıdır. Düşük bir çarpma açısı, abrazyon aşınmaya benzer bir davranış gösterir çünkü çarpma sonrası parçacıklar yüzey boyunca ilerlemeye devam ederler. Yüksek bir çarpma açısı ile tipik erozyon diyebileceğimiz aşınma mekanizmaları gösterir.



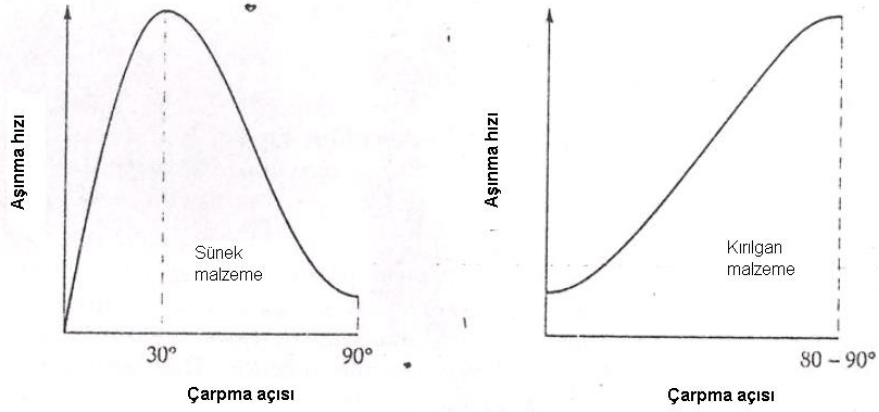
Şekil 2.2: Çarpma açısı ve hızı. [4]

Erozif parçacığın hızı, aşınma prosesinde çok büyük bir etkiye sahiptir. Hız çok düşükse, darbe sırasındaki gerilimler, plastik deformasyon oluşturmaya yetmez ve

aşınma, yüzey yorulması şeklinde oluşur. Hız örneğin 20 m/s'ye çıkartıldığında, parçacık darbesi sonucu, malzeme yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelebilir. Çoğu mühendislik malzemesinde gözüken bu sistemde aşınma, tekrarlanan plastik deformasyonlar şeklinde olur. Eğer parçacıklar yuvarlak uçlu ve küreselse, aşırı plastik deformasyon sonucu, aşınmış yüzey üzerinde, aşınan malzeme ince tabakalar oluşturur. Parçacıklar keskin ise, kesme veya kırılma parçalanma gözükür. Kırılma malzemeler yüzey altı kırılma ile aşınır. Çok yüksek parçacık hızlarında, darbeye uğrayan yüzeyin erimesi bile gözükabilir.

Parçacık boyutu da önemli bir etkidir ve erozif aşınma problemlerinin çoğu 5 – 500 µm arası boyutlarda parçacıkları kapsar, ama aşındırıcı boyutunun bu arada olmasını gerektiren bir temel neden yoktur. Alçak yörüngeli bir uydu, çok çok küçük parçacıklarla erozif aşınmaya güzel bir örnek verir. Uydu, dış atmosferdeki oksijen ve azot atomlarının darbesiyle erozyona maruz kalır ve bu, uydu gövdesinde hasara neden olur. Uzayda ayrıca sayısız meteorit vardır ve bunlar kendilerinden büyük tüm asteroid veya gezegen uydusunu darbe ile erozyona uğratar. Her iki malzeme bozulmasında da, aşındırıcı parçacıkların çarpma hızları çok yüksektir ve spesifik aşınma mekanizmaları, normalde “erozif aşınma” olarak tanımlanandan daha farklıdır. Atmosferik atomların darbeleri sırasında, bombardımana uğrayan malzemenin kristal latisinde bozulma olarak aşınma yüzeyi oluşur. Meteorit çarpmasında ise, büyük boyut ve büyük hız sonucu makroskobik hasar oluşur ve çarpma alanı etrafındaki atmosferin bozulması bile gözükabilir.

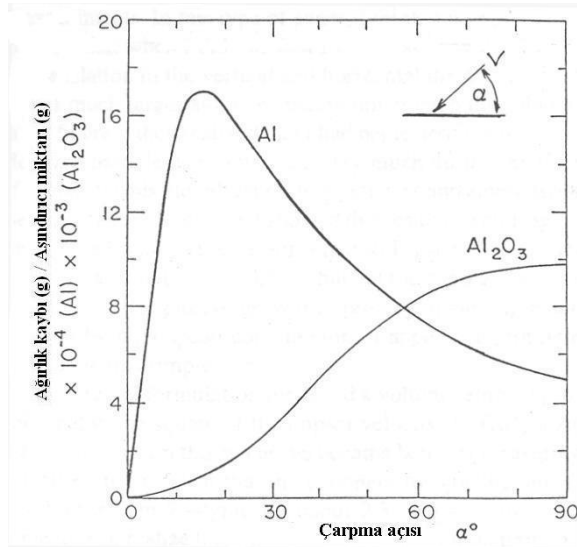
Çarpma açıları 0° ile 90° arasında olabilir. Sıfır derecedeki aşınma ihmal edilebilir çünkü aşındırıcı parçacık yüzeye çarpmaz. Fakat oldukça düşük sayılabilecek 20° gibi bir açıda, eğer parçacık sert ve yüzey yumuşaksa, çok ciddi aşınma meydana gelebilir. Bu koşullarda, abrazif aşınmaya benzer bir aşınma geçerlidir. Eğer yüzey kırılansa, en yüksek hıza 90°'ye yakın açılarda sahip olan yüzey parçalanması şeklinde şiddetli aşınma görülür. Aşınma hızı ile çarpma açısı arasındaki bağlantı, sünek ve kırılma malzemeler için ayrı ayrı Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3: Sünek ve kırılgan malzemeler için parçacık çarpma açısı ile aşınma hızının ilişkisi. [4]

Düşük çarpma açılarında erozyonun maksimum gözüktüğü durumlarda, “sünek erozif aşınma modu” geçerlidir. Tersine, maksimum aşınma yüksek açılarda gözükiyorsa, “kırılgan erozif aşınma modu” geçerlidir.

Sünek-kırılgan erozif aşınma farkı ile ilgili yapılan bir çalışmada, alüminyum metali ile alümina seramiğinin erozif aşınma davranışları karşılaştırılmış ve de Şekil 2.4’te açığa bağli olarak erozif aşınmanın miktarları gösterilmiştir [7].



Şekil 2.4: 127µm SiC parçacıkları ile 152ms⁻¹ hızda aşındırılmış 1100-0 alüminyum ve de alüminanın karşılaştırılması [7]

Parçacıkların çarpma hızı, aşınma hızında çok büyük etkiye sahiptir. Genellikle, altındaki hızlarda aşınmanın ihmal edilecek kadar düşük olduğu bir alt hız değeri vardır. Orta ve yüksek hızdaki bir çok problemi kapsayan, aşınma hızı ve çarpma hızı arasındaki ilişkiyi gösteren bir kuvvet kanunu yazmak mümkündür:

$$-dm / dt = kv^n \quad (2.1)$$

m aşınmış parçanın ağırlığı (aşınma ağırlık kaybına yol açtığı için negatiftir) [kg]

t işlem süresi [s]

k deneysel sabit

v çarpma hızı [m/s]

n hız üstü

Üst n 'in değeri genellikle katı parçacıklar için 2 – 3 arasındadır, bu değer parçacıkların kinetik enerjileri temel alınarak yapılan tahminlerin çok üstündedir. Bu eşitlik (2.1) kapsamlı değildir çünkü k değeri parçacık yoğunluğu ve şekli gibi analitik dataya sahip olmayan diğer parametreler tarafından kontrol edilmektedir. Bu, çarpma hızının aşınma hızına olan etkisini gösteren en eski eşitliklerdendir, örneğin çarpma hızı 10 kat arttığı zaman aşınma hızı 100 – 1000 kat artabilir [4].

Parçacık hızının artması ile erozif aşınma hızı artar fakat, aşınma hızının çarpma açısına olan bağlılığını değiştirmez [8].

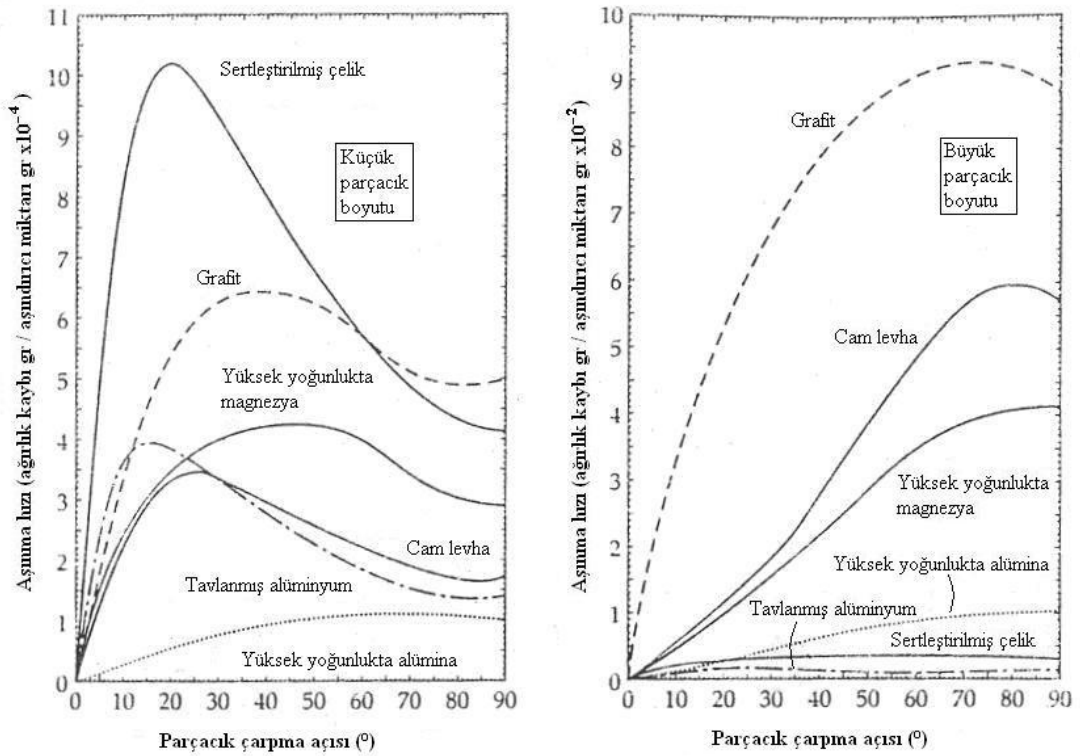
Parçacık karakteristikleri, erozyon problemlerinin önemli fakat nispeten az araştırılmış konularıdır. Sert parçacıkların yumuşak parçacıklara göre daha yüksek aşınma hızına sebep oldukları bilinmektedir. Parçacığın keskinliğinin de erozif aşınmayı arttırdığı bilinmektedir. Bu iki parametre de erozif aşınmanın sayısal modellerine eklenmişlerdir. Parçacık sertliğinin, aşınan malzemenin sertliğine oranı kontrol parametresi olarak gözükmektedir. Parçacık sertliğinin önemi, alümina gibi kimi aşındırıcıların sertliğinin, yumuşak çeliklerle karşılaştırılması durumunda daha artar. Bu durumda parçacığın malzemeye sertlik oranı 10 civarındadır. Parçacık sertliğinin aşınmadaki etkisi, meydana gelen erozif aşınma moduna (sünek veya kırılğan) bağlıdır. Kırılğan modda parçacık sertliği sünek moda göre daha önemlidir [4].

Aşındırıcı parçacığın, malzemeye göre sertliği, erozif aşınmada çok önemli bir faktördür. Abrazif aşınmada da görüldüğü gibi, parçacık sertliği, malzemenin sertliğinin altına düştüğünde aşınma hızı oldukça düşmektedir. Çeliklere yapılan ısıl işlemlerin, erozif aşınma davranışına çok fazla etkisinin olmadığı söylenmesi,

yapılan çalışmalarda, sertlikleri çeliğin çok üzerinde olan SiC ve Al₂O₃ gibi parçacıklar kullanılmasına bağlıdır [5].

Sertliği, parçacığın şekli gibi diğer özelliklerden tamamen izole etmek mümkün değildir. Parçacık sert fakat nispeten yuvarlak olduğunda şiddetli erozif aşınma oluşturmaz. Yuvarlağımsı bir parça genelde küresele yakın kıvrımlı yüzeylere sahipken, keskin parçacıklar, düz alanların küçük yarıçaplı köşelerle birleşmesinden oluşan kritik erozif aşındırıcı şekillere sahiptirler [4].

Parçacık boyutundaki farklılıklar, değişik mühendislik uygulamalarında erozyon mekanizmalarında temel değişikliklere yol açabilirler. Cam, çelik, grafit ve seramikler üzerinde yapılan bir araştırma göstermiştir ki, parçacık boyutunun 8,75 µm'den 127 µm'ye yükselmesiyle birlikte erozyon modu sünekten kırılığa dönmüştür. Bu da erozif aşınma pikinin 30°'den 80° civarına taşınmasına ve aşınma hızında, Şekil 2.5'te görüldüğü gibi çok yüksek bir artışa neden olmuştur. İki durumda da 152 m/s çarpma hızlı silisyum karbür parçacık aşındırıcı olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.5: Farklı malzemeler için küçük ve büyük parçacık kullanımına ve açığa bağlı olarak erozif aşınma hızları. [4]

Şekil 2.5'ten aynı zamanda görülmektedir ki parçacık boyutu sadece aşınma hızını değil, aynı zamanda malzemelerin aşınma dayanımı açısından sıralanmalarını da değiştirir. Aşındırıcı olarak küçük parçacıklar kullanıldığında, malzemelerin aşınma dayanımına göre sıralanmaları şu şekildedir: yüksek yoğunlukta alümina > tavlanmış alüminyum > cam levha > yüksek yoğunlukta magnezya > grafit > sertleştirilmiş çelik. Bu durumda, tavlanmış alüminyum göz ardı edilirse, erozif aşınma hızı malzemenin sertliğine bağlıdır. Alüminyumun deformasyon sertleşmesi kabiliyeti de istisnai durumu açıklayabilir. Diğer taraftan erozif aşındırıcı olarak büyük parçacıklar kullanıldığında sıralama şöyle oldu: tavlanmış alüminyum > sertleştirilmiş çelik > yüksek yoğunlukta alümina > yüksek yoğunlukta magnezya > cam levha > grafit. Yani bu durumda malzemenin tokluğu önemli olmuştur. Ne tok ne de sert olan malzemeler, grafit gibi, kötü erozif aşınma dayanımı gösterirler [4].

Sünek malzemeler için, aşındırıcı parçacıkların boyutları, 100µm'nin üzerinde olduğu sürece aşınma hızında pek etkili değildir. Fakat parçacık boyutu 100 µm'nin altına indiğinde aşınma hızı, ciddi olarak düşer. Boyut etkisi olarak bilinen bu etki, abrazif aşınmada da gözükür [5].

Aşınma modellerindeki değişim, katı içindeki delik veya kırık gibi hataların birbirlerine ortalama uzaklıkları sonucu oluşur. Eğer çarpan parçacıklar çok küçük ise, çarpma alanlarının çok azı hatalı bölgeleri barındıracaktır. Çarpma alanı, parçacığın çarptığı yerin tam altı ve parçacık boyutuna yakın, bir hayli yüksek gerilimdeki malzemenin oluşturduğu alandır. Hataların olmadığı yerlerde plastik deformasyon oluşur ve bu, küçük parçacıklar için temel malzeme kaybı modudur. Malzeme kaybı için tekrarlı plastik deformasyonlara ihtiyaç duyulmasından dolayı, bu tip aşınma nispeten yavaştır. Büyük aşındırıcı parçacıklar için, genelde her çarpma alanında bir hata mevcuttur ve bu yüzden malzeme kaybı kırılğan şekilde olur. Çatlak oluşumu çok hızlı olduğu için, kırılğan erozyon çok şiddetli bir aşınma türüdür [4].

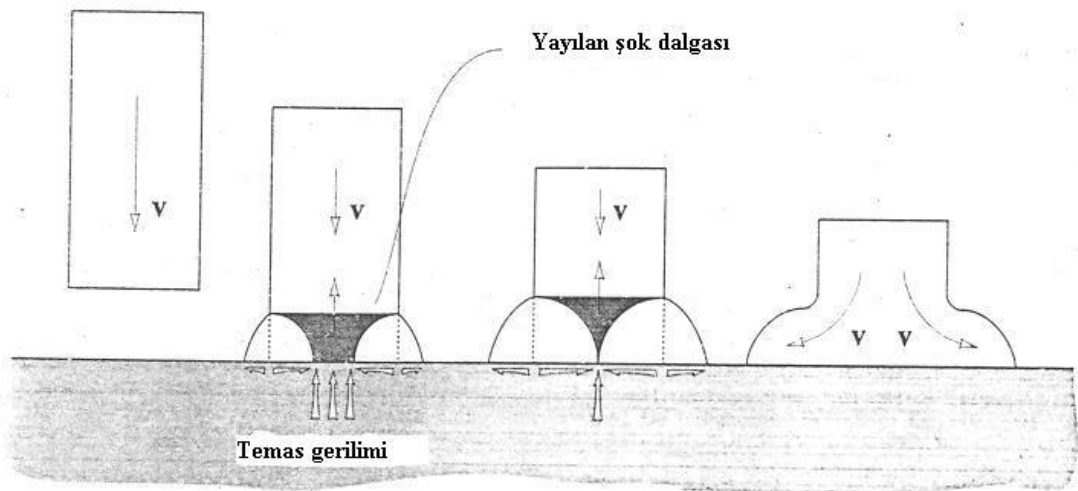
Parçacık akı değeri veya birim alana çarpan parçacıkların kütlesi ve zaman da erozif aşınma hızını kontrol eden bir başka parametredir. Erozif aşınma hızı, belirli bir limit aşınma değerine kadar akı değeriyle doğru orantılıdır. Bu limit bir çok çalışmada görülmüştür ve de geri seken parçalar ile yeni gelmekte olan parçacıkların etkileşiminden dolayı oluştuğuna inanılmaktadır. Limit parçacık akı değeri oldukça değişkendir, kauçuklar için 100 kg/m²s gibi düşük değerlerden, metallerin büyük ve

hızlı parçalarla aşınması durumunda $10,000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ gibi yüksek değerlere kadar çıkabilir. Limit akı değeri geçildiğinde aşınma hızının azalması mümkündür [4]

Erozif aşınmanın kuluçka dönemi, erozyonun başlangıcından, ölçülebilir ilk pozitif aşınmanın başına kadar olan zamandır periyodudur. Kuluçka döneminde aşınma ya ihmal edilebilir ya da negatif olabilir. Negatif olabilmesi, aşındırıcı parçacıkların aşınan malzeme üzerinde yapışarak kalmalarından mümkün olabilir. Kuluçka periyodu, yüzey altındaki hasarların birikmesine bağlıdır, örneğin kırıklar ve gerginleşmiş malzeme gibi aşınma parçacıkları kaybının öncülerine. Kuluçka dönemi geçtikten sonra aşınma genelde sabit hızla ilerler [4].

2.3 Sıvı ile Eroziyon Aşınma [4]

Çarpma hızları yeterince yüksekse sıvılar da katılar kadar erozyon hasarına neden olabilir. Bu probleme başlıca örnek bulutlar içinden uçan uçaklar veya ıslak buhar içinde çalışan türbin kanatçıklarıdır. Bowden ve Brunton'un yaptığı mükemmel deney serileri sayesinde sıvı erozyonunun temel mekanizmaları anlaşılmıştır. Bu deneylerde silindirik su damlaları çok yüksek hızlarda hedef malzemeye çarptırılmıştır. Yüksek hızda fotoğraflama sayesinde çarpma sırasında sıvı sütunu içindeki geçici şok dalgaları oluşumu gözlenebilmiştir. Şok dalgaları, darbe basıncının yayılmasına izin verir. Şok dalgaları sudan geçip gidene kadar yüksek darbe basıncı sabit kalır. Şekil 2.6'da yüzeye çarpan sıvı parçasının ve oluşan kuvvetin zamanla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Katı yüzey üzerine sıvı çarpması ile erozyon mekanizması [4]

Darbe sırasındaki temas basıncı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$p = \rho v_s v \quad (2.2)$$

p çarpma sırasında temas basıncı [Pa]

ρ sıvının yoğunluğu [kg/m³]

v_s sıvının içindeki ses hızı [m/s]

v çarpma sırasındaki sıvı hızı [m/s]

Çarpan sıvı damlacıkları sonucu oluşan çarpma basınçları oldukça yüksek olabilir.

Örneğin, 250 m/s hızda çarpan bir su damlasının çarpma basıncı:

$$p = 1000 \times 1500 \times 250 = 375 \text{ MPa}$$

1000 m/s hızda çarpan bir su damlası için yaklaşık basınç 1.5 GPa gibi çok yüksek değerlere çıkar.

Çarpma basıncının geçerlilik süresi, basınç dalgalarının damlanın merkezine ulaşma süresi ile belirlenir. Bu basınç dalgaları ses hızı ile hareket eder ve 3 μm çapındaki bir su damlası için çarpma etkisinin süresi yaklaşık 1 μs 'dir (sesin sudaki hızı 1500 m/s'dir).

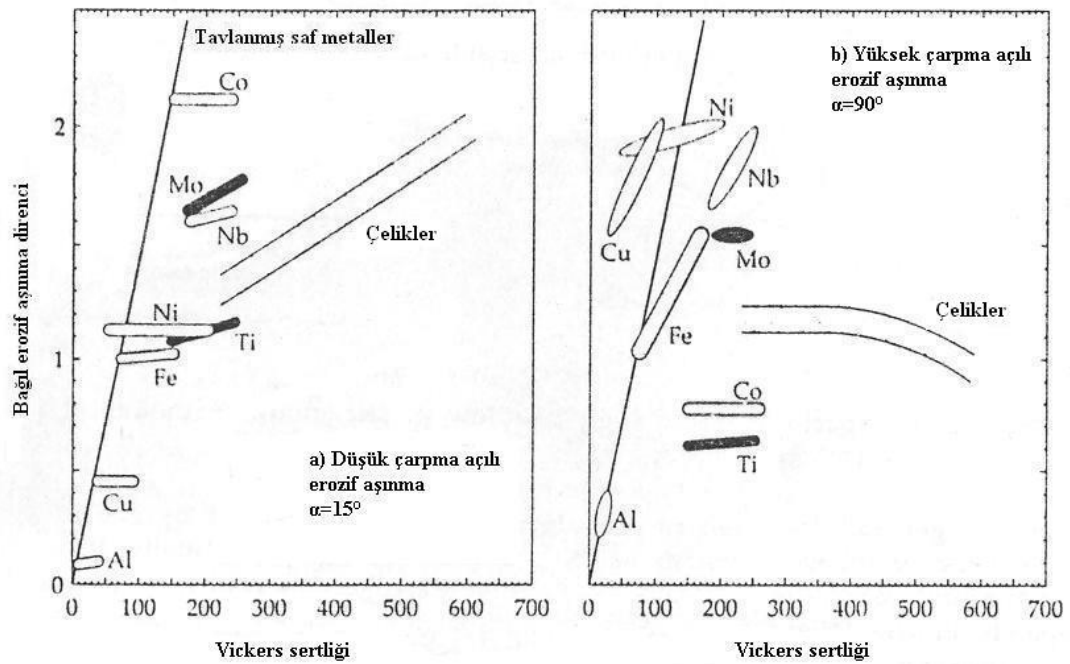
Aşınma, çarpılan malzeme üzerindeki geçici temas gerilimleri serileri sayesinde oluşur. Aşınma mekanizması sıvının hızına bağlıdır. Düşük hızlarda, aşınan malzeme önce genel olarak pürüzlenir, daha sonra değişik yerlerde rasgele krater oluşumları gözükür. Kraterlerin kenarlarında dudaklar oluşur ve daha sonraki darbelerde bunlar malzemeden kopar. Yüksek hızlarda çarpan damlarlar sayesinde delikler veya çukurluklar oluşur. Eğer kırılğan bir malzeme mevcutsa, kırılma ile aşınma da gözükabilir.

Geçmiş çalışmalar göstermiştir ki erozif aşınma direnci, malzeme tokluğuna doğru orantılıdır, mesela tıpta eklemlerde kullanılan yüksek molekül ağırlıklı polietilen, polyester reçineye göre çok daha yavaş aşınmaktadır. Eşitlik 2.2'den görülebildiği gibi, aşınma hızının çarpma hızına bağlılığı çok yüksektir. Sıvı parçacıkların çarpma sonucu erozif aşınma için eşitlikteki "n" üstü değeri metaller ve polimerler için 4 – 6 arasındır, cam için ise 12'ye kadar yaklaşır. Malzeme kaybının ihmal edilebilir olduğu bir kuluçka dönemi de gözükabilir. Kuluçka döneminin süresi, çarpma hızına ters orantılıdır. Yapılan çoğu çalışma su üstüner ve diğer sıvılar üstüne çok az çalışma

vardır. Sıvının yoğunluğunun artmasının aşınmayı arttıracasına inanılmaktadır. Buna bir örnek yaklaşık 1700 kg/m^3 yoğunluğa sahip olup, sudan çok daha hızlı erozif aşınmaya sebep olan tetraklorometandır (CCl_4).

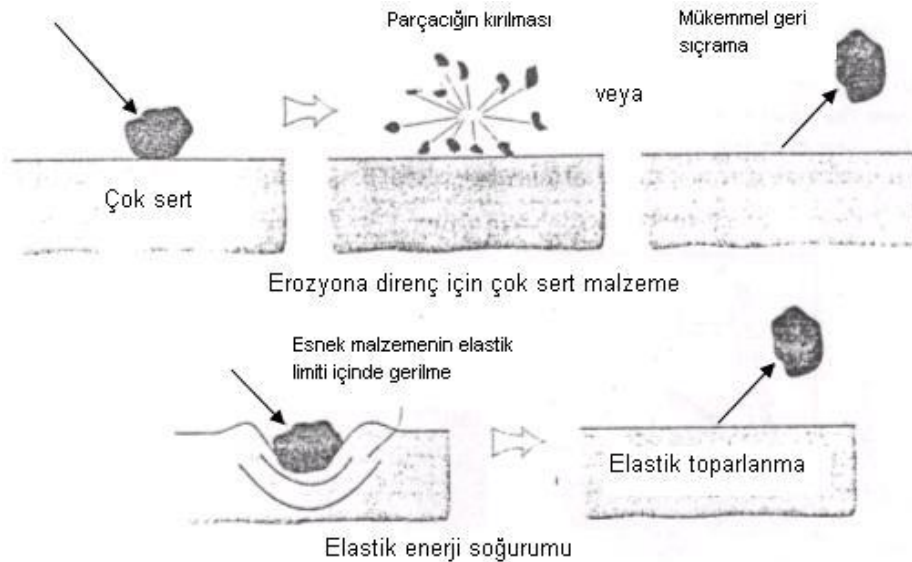
2.4 Malzemelerin Erozif Aşınma Dirençleri

Malzeme özelliklerinin erozif aşınma üzerinde çok büyük etkileri vardır ve bunların üzerine yoğun olarak çalışmalar yapılmıştır. Abrazif aşınmada da görüldüğü gibi, mekanik özelliklerdeki gelişmeler, her zaman daha iyi bir erozif aşınma dayanımına neden olmaz. Örneğin bir malzeme kasıtlı olarak sertleştirildiğinde erozif aşınma hızı artabilir. Aşınmanın azalması için malzeme optimizasyonundaki zorluk, aşınma hızını hem erozif aşınma mekanizmasının karakteristikleri hem de malzeme karakteristiklerinin kontrol ediyor olmasıdır. Bu kuralın bir canlandırması, metallerin bağıl erozyon dirençlerinin çarpma açısının bir fonksiyonu olarak gösterilmesi ile sağlanabilir. Çarpma açısının düşük olduğu durumda, sertleştirilmiş çelik, yumuşak çelikten daha az aşınır. Yüksek çarpma açılarında ise bu durumun tam tersi geçerlidir. Şekil 2.7’de 15° ve 90° için farklı sertlikteki değişik metallerin erozif aşınma dirençleri malzeme sertliğinin bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Kullanılan abrazif 1 mm çapında, 30 m/sn hızında silisyum karbürdür.



Şekil 2.7: Malzeme sertliğinin bir fonksiyonu olarak, 15° ve 90° için farklı sertlikteki değişik metallerin erozif aşınma dirençleri. [4]

Düşük açılarda, malzeme sertliği ve deformasyon sertleşmesi özelliği, aşınmayı durdurucu etki yapar. Bu durumda, malzemeler sertlik sırasına göre derecelendirilebilir. Şekil 2.7’den görülmektedir ki 15°lik çarpma açısında aşınmaya en dayanıklı metal kobalt iken, en kötülerin ikincisi bakırdır. Çarpma açısı 90° olduğunda ise, malzemelerin sıralaması önemli ölçüde değişir ve bakır ikinci en iyi metal iken, kobalt sondan üçüncü olur. Sertlik arttırmak için çeliğe yapılan ısıtıl işlem, düşük açılarda direnci artırırken, yüksek açılarda azaltır. Özetle, malzeme özelliklerindeki ufak farklılıklar, sertlik veya benzer metaller arasındaki alaşım farkları, erozif aşınmanın toplam sistem karakteristiklerinin dışında tutulamaz. Bir malzemenin erozif aşınma direncini tanımlamak için, sadece çok geniş malzeme sınıflarından bahsetmek yararlıdır, ör: polimerler, seramikler ve metaller gibi çok büyük farklılıkların gözüktüğü ve bu farklılıkların hız ve çarpma açısı ile değişmediği gruplar. Çok yüksek erozif aşınma direnci için genel bir reçete yoktur. Mevcut olabilecek iki farklı erozif aşınma önleme mekanizmasından dolayı, yüksek aşınma direnci birden fazla tür malzeme ile sağlanabilir. Kimi durumlarda malzeme çok sert ve tok olabilir, böylece çarpan malzeme yüzeyde bir iz yapamaz. Metalik veya seramik, erozyona dayanıklı malzeme geliştirilirken yapılan yaklaşım budur. Alternatif olarak, malzeme tok ve çok düşük elastik modüle sahip olabilir, bu durumda parçacıkların kinetik enerjisi zararsız bir şekilde emilir. Bu zıt aşınma koruma mekanizmaları Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Çok sert ve çok elastik malzemelerin zıt aşınma koruma mekanizmaları.
[4]

Deneyssel olarak gösterilmemiş olmasına, parçacık enerjilerini elastik olarak absorbe ettiği için kauçuğun iyi erozyon direnci gösterdiğine inanılır. İlk parçacık çarpmasının hiçbir görünür hasar göstermediği ve aşınmanın yavaş yorulma proseslerine dayandığı görülmüştür. Doldurulmamış kauçuk iyi erozif aşınma direnci gösterirken, şaşırtıcı bir şekilde abrazif aşınmaya dayanıklılığı yoktur.

Erozyona dirençli malzeme seçimi, çalışma sıcaklığı veya malzeme geçirgenliği gibi farklı durumlar da göz önüne alınır. 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda polimerler seçenek olmaktan çıkar, ama özel bir uygulama için geçirgen bir malzeme gerektiği zamanda da metaller kullanışlı olmaz. Örneğin, hava taşıtlarının ön camları, geçirgen olmaları gerekliliğinin yanı sıra, kum, toz ve yağmur tarafından oluşan yüksek hızda erozyona da dayanıklı olmalıdırlar. Polimetilmetakrilatın bu uygulama için yüksek tokluğu ve erozyon hasarına bağlı olarak minimum geçirgenlik kaybından dolayı en iyi aday olduğu bulunmuştur.

Erozif aşınmaya dayanıklı malzeme olarak metaller, polimerler ve seramiklerin bağlı faydaları ve zararları Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1: Metaller polimerler ve seramiklerin erozif aşınma dayanımları açısından karşılaştırılmaları. [4]

Malzeme	Erozif aşınmayı etkileyen bağlı özellikler
Metaller	Geniş bir tokluk ve sertlik değer aralığı sayesinde her parçacık türü veya çarpma açısına uyabilir. Yüksek sıcaklıkta korozyon ve yumuşama etkilerine açık; korozif ortamlar ayrıca zararlı.
Seramikler	Yüksek sertliğe ve gittikçe artan tokluk değerlerine sahip. Yüksek sıcaklık ve korozif ortamlara dayanıklı. Kırılgan modda düşük erozif aşınma direnci.
Polimerler	Sert polimerler ve kauçuklar korozif ortamda bile iyi erozyon direnci sağlarlar. Ama düşük sıcaklık sınırı yüzünden kullanımları sınırlanmıştır.

2.4.1 Çeliklerin Erozif Aşınma Dirençleri

Çelik mikroyapısının erozif aşınmaya etkisi ile ilgili literatür, sünek bir çeliğin aşınmaya daha çok dayanıklı olduğunu önerir. Çeliğin sertleştirilip martenzit oluşturulması, sadece çok düşük açılarda biraz iyileşme sağlarken, kütsel veya lamelli karbür oluşumu erozif aşınma direncini düşürür. Erozif aşınmayı düşürmek için çelik seçimi bu bakımdan abrazif aşınma durumundan farklıdır. Az alaşımlı karbon çelikleri için, ferritik faz ile, mukavemet arttıran yeterli miktarda kütsel

karbür inklüzyonları erozif aşınmaya karşı çok etkilidir. Perlitik çelikler, küreselleştirilmiş çeliklerden daha kötü aşınma dayanımı sergilerler. Görülmüştür ki çeliğin erozif aşınması klasik sünek erozyon karakteristikleri gösterir, örneğin en yüksek aşınma hızı 30°lik düşük açıda, yüzey altı ve yüzey kırılmaları ile gözükür. Bu da çeliğin erozif aşınma dayanımının süneklilik eksikliği ile sınırlandığını gösterir [4].

Mikroyapı, çeliklerin erozif aşınma dirençlerinde önemli bir rol oynar. Levy'nin bir çalışmasında [9], 1020 ve 1075 çelikleri, farklı ısı işlemlere tabi tutularak mikroyapı bakımından değiştirilmiş ve de erozif aşınmaya maruz bırakılmışlardır. 1075 çeliği kaba perlitik, ince perlitik ve küreselleştirilmiş şekillerde, 1020 çeliği de üç farklı küreselleştirilmiş şekilde incelenmiştir. Tüm test edilen çeliklerde, erozif aşınma hızı, alaşımdaki sert, kırılğan ve yumuşak, sünek fazların dağılımına doğrudan bağlıdır. Limitler dahilinde, sünek matris çoğaldıkça, erozif aşınma hızı da düşmüştür. Fakat, sünek matris yapıya hakim faz olup çeliğin mukavemeti buna bağlı olarak fazlasıyla düşünce, erozyondaki etkin faktör süneklilik yerine mukavemet olur. 1075 çeliğinde, sünek ferrit matrisi içinde, kırılğan karbür parçalarının küresel yapının arasına serpiştirildiği küresel yapı, karbürlerin pıhtı şeklinde olup, sünek ferrit fazının alanlarını ince bölümlere ayırdığı perlitik yapıdan daha az aşınmıştır. Üç 1020 çeliğinden ikisinde, karbür kürecikleri arasındaki mesafe arttıkça, aşınma miktarı azalmıştır. Fakat, parçacıklar arası mesafe çok uzadığı zaman, aşınma hızı, ferrit matrisinin düşük mukavemetinden dolayı artmıştır [9].

Kömür gibi çok yumuşak erozif parçacıklar için, karbür inklüzyonları aşınma direncini biraz arttırır. Çelik veya dökme demirleri alaşımlayıp belirli miktarda yapıda tutulmuş ostenit bırakmak erozif aşınmayı azaltmada etkili bir yöntemdir. Ağırlıkça %0,7 karbonlu çeliğe, %2,5 silisyum eklemek veya %2,54 karbonlu dökme demire %0,45 silisyum eklemek çok iyi erozif aşınma direncine yol açar [4].

Bu çelik ve dökme demirin optimum ısı işlemi, tüm martenzitin dağılıp sadece tutulmuş ostenit ve beynitik ferritin mevcut olacağı, uzun ostemperleme süreli bir ısı işlemidir. Genel bir kural olarak, çelikler için erozif aşınma dayanımını arttırmak için sertlikten ziyade sünekliliğin geliştirilmesi gereklidir [4].

2.4.2 Polimerlerin Erozif Aşınma Dirençleri [4]

Metallerin uygun olmadığı uygulamalarda, erozif aşınmaya dayanıklı malzemeler olarak polimerlerin önemi gün geçtikte artmaktadır. Polimerlerin erozif aşınma dirençleri genel olarak çeliklerden daha kötüdür. Yüksek çarpma açılarında, kırılmalı aşınma modu gösteren polimerler çeliklerden çok daha düşük dirence sahiptirler. Ama sünek modda aşınan polimerler çeliklerle karşılaştırılabilir dirence sahiptirler. Yine de polimerlerin sünekliliği ile erozif aşınma dayanımları arasında tutarlı bir bağıntı yoktur. Örneğin naylon sünek modda aşınır ama düşük erozif aşınma dayanımı vardır. Sık kullanılan polimerlerin erozif aşınma dirençleri bakımından iyiden kötüye doğru sıralanmaları şu şekildedir: poliüretan>florokarbon> polikarbonat > polimetilmetakrilat > naylon.

Polimerlerin bir başka erozif aşınma karakteristiği, ağırlık kazancının bile kaydedilebileceği uzun bir “kuluçka periyoduna” sahip olmalarıdır. Bu, aşındırıcı parçaların çok daha yumuşak olan polimer içinde hapsolması ile olur.

Belirli polimerlerin, özellikle sentetik kauçukların erozyonları, oksidasyon ve diğer tipte kimyasal bozulmalar ile hızlanabilir. Hidrofilik malzemelerin yüzey altlarında su ve gazlar mevcuttur. Çoğu yaygın mineral, örneğin silis veya kum hidrofiliktir. Bu parçacıkların kauçuğa çarpmalarında, yüzeydeki su veya oksijen kauçuk ile etkileşir. Kimyasal reaksiyon, kauçuk yüzeyi üzerinde mekanik olarak zayıflamış tabaka oluşturan darbe işlemindeki sıcaklık artışı ile kolaylaşır. Bu kimyasal bozulma prosesi, eğer aynı yere çarpan iki parça arasında uzun süre varsa (düşük erozif parçacık akı seviyesi) daha da hızlanır. Bu tip durumlarda, ortalama yüzey bozulması reaksiyonu süresi daha fazladır, darbe sonucu sıcaklık artışı bir süre daha devam eder. Erozif parçacık akı değeri yükselince aşındırıcı parçacığa, aşınan malzeme oranı azalır. Aşınma şiddetindeki düşme 1 kg/m² gibi düşük erozif parçacık akı değerlerinde bile görülebilir.

2.4.3 Seramiklerin ve Sermetlerin Erozif Aşınması [4]

Seramikler, erozif aşınmaya dirençli malzeme olarak genellikle metallerin başarısız olduğu veya kötü direnç gösterdikleri yüksek sıcaklık değerlerinde kullanım alanı bulurlar. Seramiklerin bu uygulamadaki temel dezavantajı, kimi durumlarda

hızlanmış aşınmaya neden olabilecek olan kırılgenlikleridir. Alümina, kısmi kararlı zirkonya ve zirkonya ile toklaştırılmış alümina, silisyum nitrür ve silisyum karbür erozif aşınma dirençleri açısından incelenmişlerdir. Alümina, zirkonya ve zirkonya ile toklaştırılmış alümina gibi oksit seramiklerinin silisyum nitrür ve karbüre göre daha yüksek erozif aşınma direncine sahip oldukları bulunmuştur. Kısmi kararlı zirkonya, yüksek hacim tokluğuna rağmen, alüminaya göre yüksek erozif aşınma direncine sahip değildir. Kobalt bağlayıcı matris içinde tungsten karbür taneler içeren sermetler de erozif aşınma dayanımı için kullanılmaktadırlar. Bu malzemelerde, daha çabuk aşınan kobalt bağlayıcının aşınması, hızı belirleyici faktör olarak kabul edilirken tungsten karbür parçacıklar erozif aşınmaya karşı çok daha dayanıklıdırlar. Abrazif aşınmanın aksine, erozif aşınma sırasında, sert karbür taneleri, yumuşak kobalt matrisi çarpan parçacıklardan korumaz.

Seramik ve seramik kompozitlerinin erozif aşınmaya dirençli malzemeler olarak kullanılmalarının önemli bir uygulaması yüksek sıcaklıktaki kullanımlarıdır. Çelik gibi metalik malzemeler, normal çevre sıcaklıklarında genelde seramiklerden daha aşınmaya dayanıklıdırlar ama yüksek sıcaklıklarda daha dayanıksızdırlar. Yüksek sıcaklıklarda, metaller aşırı yumuşaklaşırken, seramikler daha sünekleşerek, kırılgen tip erozif aşınmayı yavaşlatırlar. Silisyum karbür fiber – silisyum karbür matrisli kompozitin 25°C’de krom alaşımlı çelikten daha yüksek ama 850°C’de oldukça az aşınma gösterdiği tespit edilmiştir.

2.5 Görüldüğü Yerler

2.5.1 Türbin Kanatları

Su pompaları ve hidro-türbinler için genellikle iki tip martenzitik paslanmaz çelik kullanılır. Bunlar sırasıyla dövme 12Cr ve dökme 13Cr-4Ni çelikleridir. Bunlar mükemmel mekanik özellikleri ve yeterli korozyon dirençleri için kullanılmaktadırlar. Bu malzemeler erozif aşınmaya oldukça dayanıksızdırlar ve sudaki aşırı katı içeriği karşısında zarar görürler. Bu çelikleri borlama gibi uygun bir sert difüzyon kaplama ile korumak önem kazanmaktadır ve bu sayede abrasiv ve erozif aşınma dayanımlarının arttığı bildirilmektedir [10].

Buhar kanalı yüzeylerinin katı parçacık erozyonu, termik santrallerde önemli bir sıkıntıdır. Bu genel olarak bir demiroksit olan manyetit oluşuma bağlıdır, Manyetit, buhar üreten ferritik alaşımlı tüpler, başlıklar ve yüksek buhar sıcaklıklarına maruz kalan buhar yollarında oluşur. Belirli bir seviyeden sonra kırılır ve pul pul dökülür, kırılğan bir yapı gösterir. Bu manyetit açılmal parçalara ufalanır ve buhar kanalı içindeki tüm bileşenleri aşındırır. Buhar hızlarının en yüksek olduğu yerlerde erozyon hasarları da en yüksektir ve bu durum genelde girişte veya tekrar ısıtılan buharın sisteme yeniden girdiği yerde gözükür. Parçacık erozyonunun, parçacık boyutu, konsantrasyonu, çarpma açısı ve ana malzemenin sertliği gibi değişik parametrelerin bir fonksiyonu olduğu için, çoğu durumda dayanım yalnızca erozyona maruz kalan alanların koruyucu sert kaplanmasıyla geliştirilebilir [10].

Tablo 2.2: Dövmel 12Cr çeliği buhar türbin kanadının erozif aşınma direncinin difüzyon işlemi ile değişimi. [10]

Malzeme (çelik)	İsabet açısı	Hacim kaybı (mm ⁻³ cm ⁻² kg ⁻¹)	Açıklama
12Cr çelik “alındığı gibi”	-23	3.72	Aşının etkisi çok önemli.
	-46	9.18	
12Cr çelik “borlanmış”	-23	0.494	Aşınma dayanımı %750-925 arttı, mekanik özellikler %22 azaldı.
	-46	0.99	

Tablo 2.2’ dan gözüktüğü gibi borlanmış ve borlanmamış buhar türbin kanatçıklarının erozyon dayanımları arasında çok büyük fark vardır. Bu, borlanmış buhar türbin kanatçığının gelişmiş mikrosertliği sayesinde (1950-2000 HV, borlanmamış kanatçık 300-350 HV) [10].

Çamur erozyonu, Hindistan’daki, özellikle de Himalaya bölgesindeki hidroelektrik santralleri için ciddi bir problemdir. Bu hidroelektrik santrallerinde bu yüzden yılda 120-150 milyon Amerikan doları, verimlilikteki düşme, zorunlu kesinti ve tamirlerden dolayı kaybedilmektedir. Çamur erozyonundan dolayı hasarı azaltmak için, parçacık hızını azaltma, boyut ve konsantrasyonlarını kontrol etme veya HVOF sermet kaplamalar ve plazma nitrürleme ile yüzey sertleştirme gibi yöntemler denenmektedir. Atmosferik plazma spreyleme ile oksit kaplama, lazer prosesi ile giydirme, patlama ile spreyleme, PVD ve borlama gibi diğer kaplama türleri de bu amaçla kullanılmaktadırlar [11].

2.5.2 Buhar Kazanları

Kömür kazanlarında ısı transfer borularında ve diğer yapısal malzemelerdeki erozif, yüksek sıcaklık aşınması, güç üreten santrallerin aksaklık süresinin ana sebebidir ve toplam arızalar içinde %50-75 kadar bir bölümü kapsar. Bu tesislerdeki bozuk boruların değişim-bakım masrafları oldukça yüksektir ve toplam üretim masraflarının %54'üne kadar bir bölümü kapsar. Yüksek sıcaklıkta oksidasyon, uçan küllerin ve yanmamış karbon parçalarının çarpması ile erozyon, bu uygulamalarda çözülmesi gereken en temel sorunlardır, özellikle bileşen yüksek sıcaklığının 600°C'nin üzerinde olduğu yerlerde. Bu yüzden, endüstriyel kazanlarda aşınma ve yüksek sıcaklık oksidasyonuna dayanıklı koruma sistemlerinin gelişimi hem mühendislik hem de ekonomik açıdan çok önemlidir. Bu sorunlarla başa çıkmanın bir yolu iyi termal iletkenliğe sahip ince, aşınma ve oksidasyon dirençli kaplamalar kullanmaktır (alev, plazma-spreyli veya ses hızı üstünde oksijen fuel (hypersonic velocity oxygen fuel – HVOF) nikel kaplı veya sermet (karbür-metal) alaşımlar). Nikel-krom alaşımlar, yüksek sıcaklıkta oksidasyon ortamları ile mücadele için kullanılmaktadırlar. Termal spreyleneşmiş 50/50 nikel/krom alaşımı, güç jeneratörü uygulamalarında kazan tüpleri için erozyon-korozyon koruması olarak önerilmektedir [12].

Yüksek sıcaklıkta erozif aşınma, kömür yakan elektrik santrallerinde ciddi bir problemdir ve sık sık plansız ve masraflı kapanmalara neden olur. Bu problem özellikle kömürde yüksek kuvars bulunmasından dolayı Güney Afrika'daki kömürlü termik santrallerde çok ciddidir. Kuvarsın bir kısmı yanma bölümünden çıkar ve kazandan çıkana kadar yolda tüm parçalara erozif aşınma hasarı verir [13].

2.5.3 Uçak Motorları

Havada uçan kum ve toz gibi parçacıklar, gaz türbin motorları tarafından emilince, pervane kanatları gibi kompresör bileşenlerine ciddi hasar verebilir ve erozif etkiyle yüzey kalitesinde ve geometrisinde aşamalı değişikliklere sebep olabilirler. Bu tip bir hasar motor performansını düşürürken yakıt tüketimini ve de motorun çalışma maliyetini arttırdığı için kullanıcılar ve de üreticiler için ciddi bir sorundur. Hasar büyüdüğü zaman motor bileşenlerin bütünlüğü ve de uçağın güvenliği de söz konusu duruma gelir. Volkanik toz bulutları içinden geçen uçakların çok kısa sürede hasar

uğradıkları bilinmektedir. Çöllerin üzerinden geçen uçaklarda da havadaki kum taneciklerinden dolayı aşınma görülmektedir. Sanayiden ötürü havası kirlenmiş bölgelerde de aşınma ile birlikte korozyon etkisinden dolayı bileşenlerin hasar görmesi hızlanır. Kompresörlerdeki bu hasarları azaltmak için filtre ve parçacık ayırıcı gibi yöntemler kullanılmaktadır fakat bunlar tam olarak etkili değildir ve de uçağın ağırlığını arttırdıkları için motor performansını düşürürler. Bir başka yaklaşım aşınmaya daha dirençli malzeme kullanımı veya bileşenlerin kritik bölgelerine koruyucu sert kaplamalar yapmaktır. Kompresör kanatlarında kullanılan 17-4PH paslanmaz çeliği üzerine değişik kaplamalarla yapılan bir çalışmada en yüksek erozif aşınma direncinin PVD TiN kaplama ile sağlandığı görülmüştür [14].

2.5.4 Sondaj Cihazları

Bir malzeme aşınması türü olarak erozyon, petrol-doğal gaz uygulamalarının birçok alanında gözlenmektedir. Sondaj işlemlerinde kullanılan delici aletler buna bir örnektir. Delicilerde erozif aşınma önemlidir çünkü işlemin süresini ve maliyetini arttırabilirler. Erozif aşınmadan ötürü hasar gören bir delicideki aşınmış parçanın değişmesi gerekmektedir. Bu da, sondaj işleminin durup delicinin toprak üstüne çıkarılması, değişiklik yapıp tekrar toprak altına girmesi gibi, istenmeyen zaman kayıplarına neden olur. İşlem maliyetinin yanı sıra, erozif aşınma tehlikeli de olabilir. Cihazdaki hasardan dolayı patlama ve de potansiyel can kaybı gözükabilir. Delici aletlerin aşınma dirençlerini arttırmak için: alet yapımında daha yüksek erozyon katsayılarına sahip malzeme (tungsten karbür gibi) kullanımı, aletin geometrisini değiştirip çarpma açısı α 'yı değiştirmek (20° - 30° gibi açılardan sakınmak), delme çamurundaki katı bileşimini azaltmak, aygıtın çevresindeki akışkan hızını azaltmak yöntemleri uygulanabilir [15].

2.5.5 Pompalar

Tortulu, aşındırıcı koşullarda çalışan sulama pompaları, katı parçacıkların tekrarlı darbeleri sonucu hasar görürler. Bu tip hasara sulu çamur (slurry) aşınması denir ve de pompalama işlemleri için çok ciddi bir sorundur. Sulu çamur aşınması, çarpma değişkenleri, parçacık değişkenleri ve de malzeme değişkenlerine bağlı olduğu için, yeni bir malzemenin sulu çamur aşınması direncini tahmin etmek çok zordur. Bu nedenden dolayı yeni bir aşınmaya dirençli malzeme adayını, özellikle kaplama

malzemesini deneyler yaparak seçmek gerekmektedir. Son zamanlarda geliştirilmiş elastomerik astar malzemelerin, kum pompaları, sulu çamur pompaları ve lağım pompalarında faydalı kaplamalar olacakları düşünülmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda sıvı elastomerin ve de kauçuğun, martenzitik paslanmaz çelik ve de sert metallerden daha yüksek aşınma direnci gösterdikleri görülmüştür [16].

2.5.6 Valfler

Kontrol valfleri, petrokimyasal ve işleme endüstrilerinde sıvı akışını ayarlamak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Çok farklı kullanım ortamlarına sahiptirler. Bu ortamların kimisi aşırı şiddetli olup, sadece korozyif değil aynı zamanda ürün akışındaki kumlardan dolayı erozyif de olur. Kum, rezervin kumtaşı jeolojisinin bozulması sonucu oluşur. Bu durum özellikle su altında, kuyu başına yakın ama kum ayırıcılardan önceki kısma valflerinde gözükür. Bu yerlerde, valfler yüksek basınç düşüşlerinde (100-400 bar) çalışırlar ve bu koşullar, 500 m/s hızlarına ulaşan akışlara neden olur. Bu akışlarda, kum tanecikleri genelde sıvı hammadde içine hapsolür (genelde 5-50 ppm wt., max. 400-500 ppm wt.) ve sıvı-kum karışımının valfin iç yüzeylerine çarpması yüksek erozyif hasara neden olur. Yüksek basınçta kuru gaz veya düşük seviye sıvı hidrokarbonların üretildiği kuyularda, hasar daha büyük olabilir. Bu durumlarda, 400-800 bar arası basınç düşüşleri ve petrol-gaz akışları olarak sırasıyla 100,000-200,000 kg/saat değerleri görülebilir. Kısma valfleri bir çok bozulma mekanizmalarına maruz kalırlar, fakat katı parçacık erozyonu en önemli bozulma nedenidir. BP'nin bir araştırmasında bulunan sonuçlara göre, iki yıllık bir süre içinde bozulan 258 kısma valfinin %35'i erozyon nedeniyle bozulmuştur. Aşırı koşullarda, Kuzey Denizi'nde, 18-24 ay arası çalışması beklenen kritik bileşenlerin birkaç saat içerisinde tamamen parçalandıkları görülmüştür. Hasar görmüş valflerin değişim maliyetleri, valf başına yaklaşık 300.000 İngiliz sterlinidir ve bu rakam planlanmamış kapanmayı ve kayıp üretimi içermez. Buna ek olarak, değiştirme operasyonlarında önemli zorluklar yaşanır. Bu zorluklar, daha zor erişilebilen rezervlerin kullanılma açılması ile (Shetland'in batısı gibi) daha da artacaktır. Bu yüzden, bu valflerin çalışma ömürlerinin arttırılmasının ekonomi ve güvenlik açısından çok büyük önemi vardır [17].

Kısma valflerinde en geniş şekilde kullanılan malzeme semente-tungsten karbürdür; fakat, tipik kullanım süresi hâlâ en fazla üç yıldır. Yüksek maliyetle birlikte hasarlı

deniz-altı valflerinin planlanmamış değişimleri, petrol platformu işletmecilerine, valf ömrünün uzatılmasını araştırmaya yöneltmiştir. Son zamanlarda araştırma, daha sert ve aşınmaya daha dirençli malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır. Kaçınılmaz bir şekilde, elmasın yüksek sertliği ve aşınma direnci, onu apaçık bir aday haline getirmiştir. Elmas, CVD tekniği ile kaplama olarak uygulanmaktadır. Fakat, erozyon direncini en yüksek hale getirmek için, optimum kaplama kalınlığını bilmek gerekmektedir. Çok ince kaplamalar, kum taneciklerinin çarpması sonucu oluşan gerilmelere karşı koyamazlar. Aynı şekilde, gereğinden fazla kalın kaplamalar, ekonomik olarak kayıptır ve de kalıcı gerilmeler yeterince yüksekse kaplamanın ana yapıdan kopmasına yol açabilir [18].

2.5.7 Kömür Pulverize Değirmeni

KSG kömür pulverize değirmenleri, kömürü, enerji üretimi için büyük kazanlara üflenmelerinden önce, ufak parçalara ayırma işleminde kullanılırlar. Değirmenin, on adet dövme plakasına sahip büyük bir tekerleği vardır. Bu dövme plakaları, gelen kömürleri, sabit durmakta olan zırh çubuğuna bastırırlar. Tekelerin çapı 2,2 metredir ve de 750 rpm ile döner. Bu da dövme plakalarına yaklaşık 86 ms^{-1} çizgisel hız verir. Gelen kömür (parçalarının %95'i $<50\text{mm}$) değirmenin içine 270°C 'ye ısıtılmış hava ile üflenir. Oluşan pulverize malzeme (parçaların %75'i $<75\mu\text{m}$) yaklaşık 65°C 'lik sıcak hava ile dışarı çıkar. Dövme plakaları genel olarak dökme ostenitik manganlı çeliklerden yapılmaktadır. Bu çeliğin tokluğu çok yüksek olmasına rağmen, kömür pulverizasyonu sırasında oluşan aşınma koşullarına çok uygun değildir. Aşınmaya daha dirençli bir malzeme olarak beyaz dökme demir bu uygulama için düşünülmüştür ama tokluk değerindeki eksikten dolayı pulverize değirmenlerinde kullanımı mümkün olamamıştır. Fakat döküm bağlanma (cast bonding) prosesi uygulamaya geçince, beyaz dökme demir gibi parçaların, çelik altlık malzeme üzerinde kullanılmaları ile, şiddetli darbe aldıkları uygulamalarda da sağlamlıkla kullanılabilmeleri mümkün olmuştur [19].

2.5.8 Kimya-Gıda Sanayii

Ostenitik paslanmaz çelikler, korozyon dayanımının önemli olduğu, gıda ve kimya sanayilerindeki sıvı akışkanları taşımaya, işlemeye yarayan parçalar gibi birçok bileşenlerde kullanılmaktadırlar. Bununla beraber, sert parçacıkların mekanik

hareketleri altında, bu çelikler yüksek plastik deformasyon ve aşınma gösterirler. Eğer korozyon bir çözelti bu parçaları taşıyorsa, korozyona bağlı yüzey hasarı, korozyonla erozyon arasındaki birlikte çalışan mekanizmalar sayesinde daha da artar. Diğer bir taraftan, martenzitik paslanmaz çelikler erozyon parçacıklarına, östenitik çeliklerden daha iyi mekanik dayanım gösterirler fakat onların da korozyon dirençleri daha düşüktür. Titanyum nitrid (TiN) kaplamalar, östenitik çeliklerin mekanik dayanımlarını ve martenzitik çeliklerin korozyon dayanımlarını arttırmak için alternatif bir metod olarak kullanılmaktadırlar. Yüksek sertlik, ergime noktası ve iyi kimyasal kararlılık sonucunda, TiN kaplamalar aşınma ve korozyon durumları altında yüzey özelliklerini geliştirirler [20].

2.5.9 Maden İşleri

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler (WCI) çok yüksek erozyon ve abrazyon aşınma dirençlerinin gerekli olduğu şiddetli çalışma koşullarında kullanılmaktadır. Bu malzemeler, cevher, kömür, çakıl ve çimento gibi sert malzemelerin kırma, öğütme ve pompalama cihazlarında kullanılmaktadırlar. Üstün abrazyon ve erozyon aşınma dirençleri, temel olarak yüksek hacimde sert karbürlere sahip olmalarındandır, ama anaforun tokluğu da aşınma direncine katkıda bulunur [21].

Ostempelenmiş sünek demir, parçacık erozyonuna dayanması için, taş ve maden endüstrisinde taşıma araçları, kum püskürtme ve tarımsal cihazlar gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar. Beynitik üzeri ostempelenmiş sünek demirin çok yüksek erozyon dayanımı gösterildiği görülmüştür. Bunun sebebi, yapıda kalmış östenitin gerilme etkisinde martenzite dönüşmesidir [22].

3. ÇELİKLERİN AŞINMA DİRENCİNİ ARTTIRICI İŞLEMLER

3.1 Çeliklerde Yüzey Sertleştirme

Birçok çeşit tekniği içeren yüzey sertleştirme işlemi, parçaların aşınma dirençlerini, içlerindeki daha yumuşak ve tok yapıyı etkilemeden arttırmak için kullanılır. Sert yüzeyin ve de darbe sonucu kırılmaya direncin bu kombinasyonu, mil dirsekleri veya çark dişlileri gibi hem aşınmaya dirençli sert yüzeye hem de çalışma sırasındaki darbeye dayanıklı tok içyapıya sahip olması gereken parçalarda çok kullanışlıdır. Ayrıca, çeliğin yüzey sertleştirmesinin, tüm yapıyı sertleştirmeye göre avantajı şudur ki, daha ucuz olan düşük ve orta karbonlu çeliklerin, kalın kesitlerin sertleştirilmesi sırasındaki bozulma ve kırılmalara maruz kalmadan kolaylıkla yüzeyleri sertleştirilebilir.

Yüzey sertleştirmenin değişik yöntemlerine iki tamamen farklı yaklaşım vardır (Tablo 3.1):

- Kasıtlı bir artmayı veya yeni bir tabakanın eklenmesini içeren yöntemler
- Kasıtlı artma veya parça boyutlarında değişiklik içermeyen yüzey ve altyüzey modifikasyonları

İlk yüzey sertleştirme yöntemleri grubu, ince tabaka (thin film), kaplama (coating) veya kaynakla eklenen tabaka (weld overlays - hardfacing) kullanımını içerir. Bu işlemler, üretim miktarları artıp, özellikle parçanın tüm yüzeyi sertleştirilecekse, maliyet etkinliklerini düşürmektedirler. Ayrıca bu eklenen tabakanın yorulma performansı da, ana yapı ve eklenen tabakanın bağlanma kuvvetine bağlı olarak, kısıtlayan bir faktör olabilir. Füzyon kaynağı ile eklenen tabakalar güçlü bağlara sahiptir, fakat yorulma yüklü aşınma uygulamalarında kullanılan temel yüzey sertleştirilmiş çelikler, ağır kutu-sertleştirilmiş çelikleri ve alev veya endüksiyon ile sertleştirilmiş çelikleri içerirler. Bununla beraber, kaplamalar ve eklenen tabakaların

oldukça etkili oldukları uygulamalar vardır. Takım çeliklerinde, örneğin, TiN ve Al_2O_3 kaplamalar sadece sertliklerinden dolayı değil, kimyasal inertlikleri sayesinde oyuklanma aşınması ve de çıkan talaşların takıma kaynaklanmasını engellemelerinden dolayı da çok etkilidirler. Eklenen tabakalar, geniş alanların seçmeli sertleştirilmesi gerektiği zaman etkilidirler.

Tablo 3.1: Yüzey sertleştirme yöntemleri [23]

Tabaka ekleme	Altlık malzemesine muamele
Sertyüzeyleme (Hardfacing)	Difüzyon yöntemleri
Füzyonla sertyüzeyleme (kaynakla örten tabaka)	Karbürleme
Termal sprej (füzyonsuz bağlanan örten tabaka)	Nitrürleme
	Karbonitrürleme
	Nitrokarbürleme
Kaplama	Borlama
Elektrokimyasal kaplama	Titanyum-karbon difüzyonu
Kimyasal buhar çöktürme (akımsız kaplama)	Toyota difüzyon prosesi
İnce tabakalar (fiziksel buhar çöktürme, püskürtme, iyon kaplama)	
İyon karıştırma	Tercihli sertleştirme yöntemleri
	Alevle sertleştirme
	Endüksiyonla sertleştirme
	Lazerle sertleştirme
	Elektron demetiyle sertleştirme
	İyon implantasyonu
	Tercihli karbürleme ve nitrürleme
	Ark lambaları kullanımı

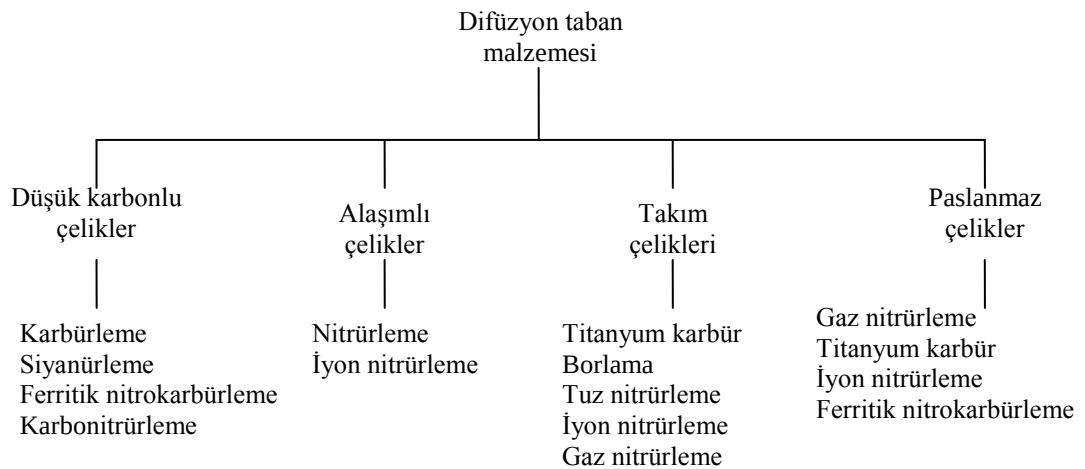
İlk yüzey sertleştirme yöntemleri grubu, ince tabaka (thin film), kaplama (coating) veya kaynakla eklenen tabaka (weld overlays - hardfacing) kullanımını içerir. Bu işlemler, üretim miktarları artıp, özellikle parçanın tüm yüzeyi sertleştirilecekse, maliyet etkinliklerini düşürmektedirler. Ayrıca bu eklenen tabakanın yorulma performansı da, ana yapı ve eklenen tabakanın bağlanma kuvvetine bağlı olarak, kısıtlayan bir faktör olabilir. Füzyon kaynağı ile eklenen tabakalar güçlü bağlara sahiptir, fakat yorulma yüklü aşınma uygulamalarında kullanılan temel yüzey sertleştirilmiş çelikler, ağır kutu-sertleştirilmiş çelikleri ve alev veya endüksiyon ile sertleştirilmiş çelikleri içerirler. Bununla beraber, kaplamalar ve eklenen tabakaların oldukça etkili oldukları uygulamalar vardır. Takım çeliklerinde, örneğin, TiN ve Al_2O_3 kaplamalar sadece sertliklerinden dolayı değil, kimyasal inertlikleri sayesinde

oyuklanma aşınması ve de çıkan talaşların takıma kaynaklanmasını engellemelerinden dolayı da çok etkilidirler. Eklenen tabakalar, geniş alanların seçmeli sertleştirilmesi gerektiği zaman etkilidirler.

İkinci yüzey sertleştirme yöntemleri, difüzyon metodları ve de seçmeli sertleştirme metodları olarak ikiye ayrılırlar (Tablo 3.1). Difüzyon yöntemleri, çeliğin yüzeyindeki kimyasal bileşimi, karbon, azot ve bor gibi sertleştiricilerle değiştirir. Difüzyon yöntemleri, tüm yüzeyin etkili sertleştirilmesine imkan sağlar ve de genellikle çok sayıda parça sertleştirileceği zaman kullanılırlar. Tersine, seçmeli sertleştirme yöntemleri, yerel sertleştirmeye imkan sağlar. Tercihli sertleştirme genellikle dönüşüm sertleşmesini (ısıtma ve su verme ile) içerir, fakat bazı seçmeli sertleştirme yöntemleri (seçmeli nitrürleme, iyon implantasyonu ve iyon ışın karışımı [ion beam mixing]) sadece bileşim değiştirme tabanlıdır.

3.1.1 Difüzyonla Yüzey Sertleştirme Yöntemleri [23]

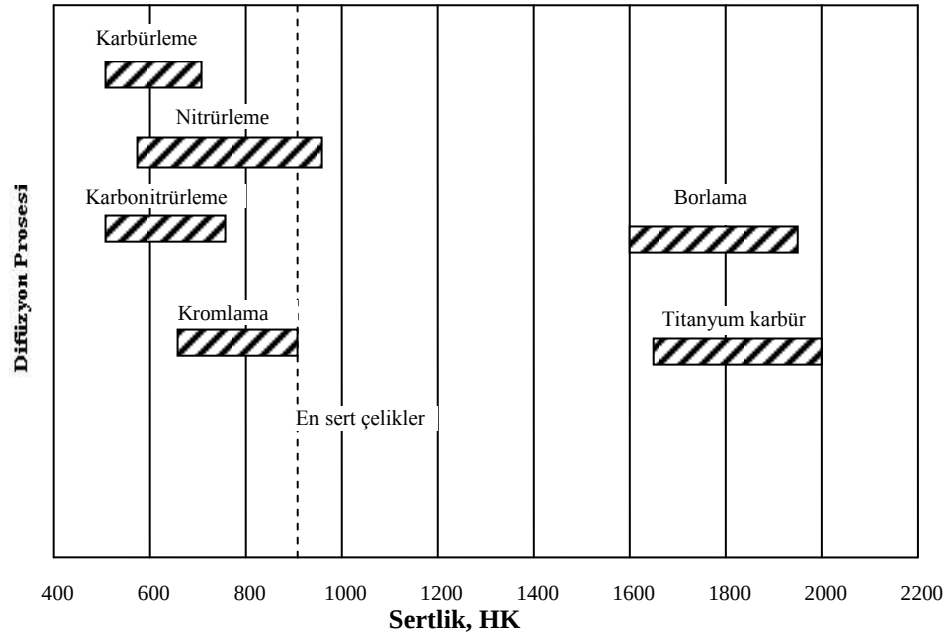
Difüzyonla sertleştirme yöntemleri, çok çeşitli sertleştiricileri (karbon, azot ve bor gibi) ve sertleştiriciyi taşıyıp yüzeye yerleştirecek proses yöntemlerinden birini içerir. Proses yöntemleri, sertleştiricinin gaz, sıvı veya iyon olarak taşınmasını içerir. Bu proses çeşitlilikleri doğal olarak tipik nüfuz derinliği ve sertliğinde farklılıklara yol açarlar (Tablo 3.2). Difüzyon yönteminin uygunluğunu etkileyen faktörler, çelik tipi (Şekil 3.1), istenen yüzey sertliği (Şekil 3.2) ve yüzey derinliğidir (Şekil 3.3).



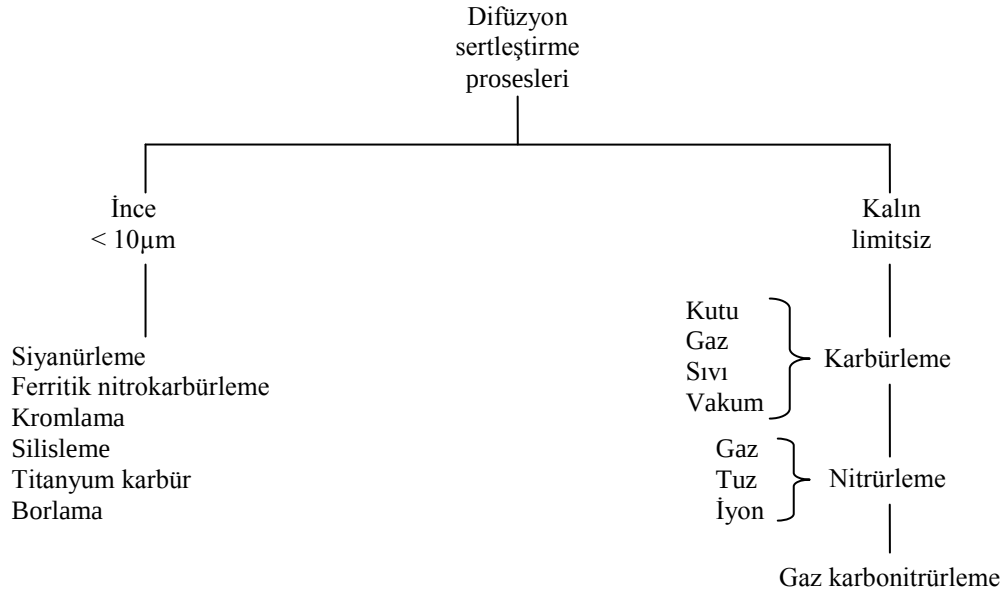
Şekil 3.1: Değişik difüzyon prosesleri için kullanılan çelik türleri [23]

Tablo 3.2: Difüzyon işlemlerinin temel özellikleri [23]

Proses	Kaplamanın doğası	Proses sıcaklığı (°C)	Tipik kaplama derinliği	Sertlik, HRC	Tipik Taban Malzemesi	Proses karakteristiği
Karbürleme						
Kutu	Karbon difüzyonu	815-1090	125µm-1.5mm	50-63	Düşük karbonlu çelik, düşük karbonlu alaşımlı çelik	Düşük ekipman maliyeti, yüzey derinliğini kontrol zor
Gaz	Karbon difüzyonu	815-980	75µm-1.5mm	50-63	"	Derinlik kontrolü kolay, sürekli işleme uygun, iyi gaz kontrolü şart, tehlikeli olabilir
Sıvı	Karbon ve muhtemelen azot difüzyonu	815-980	50µm-1.5mm	50-65	"	Kutu ve gazdan hızlı, tuz atımı sorunu olabilir, tuz banyoları sık bakım gerektirir
Vakum	Karbon difüzyonu	815-1090	75µm-1.5mm	50-63	"	Mükemmel proses kontrol, parlak parçalar, en hızlı, yüksek ekipman maliyeti
Nitrürleme						
Gaz	Azot ve bileşimlerinin difüzyonu	480-590	125µm-0.75mm	50-70	Alaşımlı çelik, nitrürleme çeliği, paslanmaz çelik	En sert yüzeyler nitrürleme çeliklerinde, su verme gereksiz, düşük bozulma, yavaş proses, genelde yığın işlemi
Tuz	Azot ve bileşimlerinin difüzyonu	510-565	2.5µm-0.75mm	50-70	Demirli metallerin çoğu, dökme demir dahil	Genelde ince sert yüzeyler (<25µm) için, beyaz tabaka yok, çoğu patentli prosesler
İyon	Azot ve bileşimlerinin difüzyonu	340-565	75µm-0.75mm	50-70	Alaşımlı çelik, nitrürleme çeliği, paslanmaz çelik	Gazdan daha hızlı, beyaz tabaka yok, yüksek ekipman kontrolü, yakın yüzey kontrolü
Karbo-nitrürleme						
Gaz	Karbon ve azot difüzyonu	760-870	75µm-0.75mm	50-65	Düşük karbonlu çelik, düşük karbonlu alaşımlı çelik, paslanmaz çelik	Karbürlemeden daha düşük sıcaklık (daha az bozulma) ve biraz daha yüksek sertlik, gaz kontrolü kritik
Sıvı (siyanürleme)	Karbon ve azot difüzyonu	760-870	2.5µm-125mm	50-65	Düşük karbonlu çelik	Kritik olmayan parçalarda ince kaplama için iyi, yığın proses, tuz atımı problemi
Feritik nitro-karbürleme	Karbon ve azot difüzyonu	565-675	2.5µm-25mm	40-60	"	Düşük karbonlu çeliklerde ince kaplamalar için az bozulmalı bir proses, genelde patentli
Diğer						
Alüminyumlama (kutu)	Alüminyum difüzyonu	870-980	25µm-1mm	<20	Düşük karbonlu çelik	Yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci
Silisyumlama (CVD)	Silisyum difüzyonu	925-1040	25µm-1mm	30-50	"	Korozyon ve aşınma direnci, atmosfer kontrolü kritik
Kromlama (CVD)	Krom difüzyonu	980-1010	25-50µm	Düşük C <30, yüksek C 50-60	Yüksek ve düşük karbonlu çelik	Kromlanmış düşük karbonlu çelikler ucuz paslanmaz çelik gibidir, yüksek karbonlu çeliklerde korozyona dirençli sert tabaka oluşur
Titanyum karbür	Karbon, titanyum, TiC difüzyonu	900-1010	2.5-12.5µm	>70 (a)	Alaşımlı çelik, takım çeliği	Aşınmaya dirençli ince karbür (TiC) tabakası oluşur, yüksek sıcaklık bozulmaya sebep olabilir
Borlama	Bor ve bileşiklerinin difüzyonu	400-1150	12.5-50µm	>70	Alaşımlı çelik, takım çeliği, kobalt ve nikel alaşımları	Sert bileşik tabakası oluşturur, genelde sertleştirilmiş takım çeliklerine uygulanır, yüksek sıcaklık bozulmaya sebep olabilir



Şekil 3.2: Belirli difüzyon prosesleri ile çeliklerde elde edilebilen sertlik aralıkları [23]



Şekil 3.3: Tipik kaplama kalınlığına göre difüzyon proseslerinin sınıflandırılması [23]

3.1.1.1 Karbürleme

Karbürleme, düşük karbonlu çeliklerin yüzeylerine, karbon çözünürlüğü yüksek olan östenitin kararlı kristal yapı olduğu 850-950°C arasındaki sıcaklıklarda karbon ekleme işlemidir. Yüksek karbonlu yüzey tabakasına su verilerek martenzit oluşur, böylece tok, düşük karbonlu çelik çekirdeğin üzerine iyi aşınma ve yorulma dirençli, yüksek karbonlu martenzit tabakası oluşturulmuş olur. Çeşitli difüzyon yöntemleri içinde en çok kullanılanı gaz karbürlemedir, onu gaz nitrüleme ve karbonitrüleme takip eder.

Karbürleme yöntemleri şunlardan oluşur:

- Gaz karbürleme
- Vakum karbürleme
- Plazma karbürleme
- Tuz banyosu karbürleme
- Paket karbürleme

Bu yöntemler karbonu, gaz (atmosferik gaz, plazma ve vakum karbürleme), sıvı (tuz banyosunda karbürleme) veya katı bileşikler (kutu karbürleme) kullanarak yapıya sokarlar. Tüm bu yöntemlerin kısıtlamaları ve avantajları vardır, ama büyük ölçekteki üretimlerde, hassas kontrol imkanı sağladığı ve de özel işlemlere az ihtiyaç duymasından dolayı gaz karbürleme en çok kullanılır.

Vakum karbürleme ve plazma karbürleme, fırın atmosferinde oksijen bulunmadığından dolayı uygulama alanları bulmuştur. Tuz banyosu ve kutu karbürleme hala arasıra uygulanmasına rağmen günümüzde ticari önemleri azalmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri ve de Kanada'da yapılan bir araştırmaya göre, 800 ticari kuruluşun %70'i karbürleme yapmaktadır ve bunlarda:

- %48 gaz atmosferinde karbürleme
- %19 kutu karbürleme

- %12 tuz karbürleme
- %5 akış yatakta karbürleme
- %2 vakum karbürleme
- %1 iyon karbürleme yapılmaktadır.

3.1.1.2 Nitrürleme

Nitrürleme, çelik 500-550°C arasında, ferritik durumdayken, yüzeyine azot ekleme işlemidir. Yüzey kompozisyonunun değiştirilmesi bakımından karbürlemeye benzerken, azotun östenit yerine ferrit fazına yedirilmesinden dolayı karbürlemeden biraz farklıdır. Nitrürlemenin, östenit fazına kadar ısıtmayı içermemesinden dolayı, işlem minimum bozulma ve mükemmel boyut kontrolü ile gerçekleştirilebilir.

Nitrürlenmiş çelikler genelde orta karbonlu (su verilip temperlenmiş), alüminyum, krom, vanadyum ve molibden gibi güçlü nitrür yapıcı elementler içeren çeliklerdir. En önemli sertleşme, %1 Al içeren özel bir alaşımlı çelik grubu (nitralloy) ile elde edilir. Bu çelikler nitrürlendiğinde, alüminyum AlN parçacıkları oluşturur. Bu parçacıklar ferrit yapısını gererler ve güçlendiren dislokasyonlar oluştururlar. Titanyum ve krom da sertliğin artması için kullanılır ama alaşım miktarı arttıkça, sert yapının derinliği azalır. Mikroyapı da nitrürlenebilirliği etkiler, çünkü ferrit, azot difüzyonunu kolaylaştırır ve düşük karbür içeriğinden dolayı hem difüzyonu hem de yüzey tabakasının sertleşmesini kolaylaştırır. Genelde ısıtma işlemi görmüş (su verilip temperlenmiş) alaşımlı çelikler nitrürlemede kullanılır.

Nitrürleme için işlem yöntemleri gaz (kutu fırın veya akışkan yatak), sıvı (tuz banyosu) ve plazma (iyon) nitrürlemeyi içerir. Amerika Birleşik Devletleri ve de Kanada'da yapılan bir araştırmaya göre, 800 ticari kuruluşun %30'u nitrürleme yapmaktadır ve bunlarda:

- %21 gaz nitrürleme
- %7 tuz banyosu nitrürleme
- %6 akışkan yatak nitrürleme

- %5 plazma nitürleme yapılmaktadır.

Bu tekniklerin avantaj ve dezavantajları karbürlemeninkilere yakındır. Fakat, gaz nitürlemenin süresi oldukça uzun olabilir (uygulamaya bağlı olarak 10 saatten 130 saate kadar) ve tabaka derinliği de oldukça düşüktür (0.5mm'den az). Plazma nitürleme daha hızlı nitürleme işlemine izin verir. Plazma nitürleme aynı zamanda püskürtme ile yüzeyi de temizleyebilir.

3.1.1.3 Karbonitrürleme

Karbonitrürleme, çeliğin östenit fazına karbon ve azot sokarak yapılan bir yüzey sertleştirme ısı işlemidir. Bu işlem, östenit fazının bileşimin değiştiği ve de yüksek yüzey sertliğinin su verme ile martenzit oluşumu ile sağlanmasından dolayı karbürlemeye benzer. Bununla beraber, azotun sertleştirilebilmeyi arttırmasından dolayı karbonitrürleme, düşük karbonlu çelikleri kullanarak, yüksek alaşımlı karbürlenmiş çeliklerin sertliğine, şiddetli bir su vermeye gerek olmadan, daha az bozulma ile ve de düşük parça kırılma riski ile ulaşma imkanı verir. Belli bir ölçüye kadar, sertleşme nitür oluşumlarına da bağlıdır.

3.1.1.4 Östenitik Nitrokarbürleme

Düşük karbonitrürleme sıcaklıklarının (700-760°C), patlama riski ve de kırılgan yapı oluşumundan dolayı kullanılmamalarına rağmen, karbonitrürlemenin düşük sıcaklıklar için bir varyantı geliştirilmiştir. Genelde östenitik nitrokarbürleme olarak adlandırılan bu teknik, sabit olarak 675-775°C arası uygulanır. Karbonitrürlemenin tersine, nitrokarbürlemedeki sertleşme etkisi temel olarak ϵ karbonitrürlerinin oluşumuna bağlıdır. Bu, su verme ihtiyacını ortadan kaldırabilir.

3.1.1.5 Ferritik Nitrokarbürleme

Ferritik nitrokarbürleme, karbon ve azotun ferrit fazına difüzyonu ve de ince beyaz bir ϵ karbonitrür tabakasının oluşumunu kapsar. Azotun taban malzemesinde difüzyonu, yorulma direnci için gereklidir. Oluşan sert tabaka incedir fakat nitrokarbürlemede oluşan ϵ karbonitrürlerinin parçalanmaya eğilimi, klasik nitürlemede oluşan beyaz tabakaya göre daha azdır.

3.1.1.6 Borlama

Borlama, metal yüzeylerine bor difüzyonu ile sertlik ve aşınma direncinin artırılması işlemidir. Borlama genellikle, ısıl işlemle sertleştirilmiş takım çeliklerine uygulanır. Borlama teknikleri, metalleme (metallizing), CVD ve kutu sementasyonu içerir.

3.1.1.7 Titanyum Karbür

900-1010°C arası proses sıcaklıklarında, titanyum ve karbon, kimyasal buhar yoğunlaştırma sırasında difüzyon ile titanyum karbür tabakası oluştururlar. Bu işlem genelde takım çeliklerine ve sertleşebilen paslanmaz çeliklere uygulanır. İşlem östenis sıcaklığının üzerinde yapıldığı için çekirdeğin sertleşmesi için su verme işlemine ihtiyaç vardır.

3.1.2 Tercihli Yüzey Sertleştirme Yöntemleri [23]

Çelik yüzeylerinin tercihli sertleştirilmesi, tipik olarak yerel ısıtma ve su verme ile, genelde yüzeyde kimyasal değişiklik yapmadan elde edilir. Fakat, seçmeli sertleştirme yöntemlerinden iyon implantasyonu ve seçmeli karbürleme gibi yöntemlerde yüzeyde kimyasal değişiklik görülür.

3.1.2.1 Alevle Sertleştirme

Alevle sertleştirme, çelik yüzeyini oksiasetilen veya oksihidrojen alevi ile ısıtarak östenitleyerek, ani olarak su ile su verme işlemidir. İşlemin sonucu olarak, ferrit-perlit yapılı yumuşak iç yapının üzerinde sert martenzit tabakası oluşur. Kimyasal bileşimde bir değişiklik yoktur, bu yüzden alevle sertleştirilecek çelikte, istenen yüzey sertliğine ulaşabilmesi için yeterli miktarda karbon bulunması gerekir. Isıtma hızı ve ısının iç yapıya iletimi, sert tabakanın derinliğini ayarlamak için, yüksek sertleşme kapasitesine sahip çelik kullanımından daha önemlidir.

3.1.2.2 Endüksiyonla Isıtma

Endüksiyonla ısıtma oldukça değişken bir ısıtma yöntemidir ve düzenli yüzey sertleştirme, bölgesel yüzey sertleştirme, tüm yapıyı sertleştirme ve sertleşmiş parçaların temperlenmesi gibi işlemleri yapabilir. Isıtma, yüksek frekansta alternatif akım geçmesi ile manyetik alan oluşturan, su soğutmalı bakır sarmal bir endüktörün içine çelik parçasının konması ile olur. Endüksiyon ile oluşan ısıtmanın derinliği

alternatif akımın frekansına bağlıdır. Frekans arttıkça ısıtma daha ince tabakaya etki eder. Bu yüzden, derin sertleştirmeler ve hatta tüm kesitin sertleştirmesi yapılmak istendiği zaman düşük frekanslar kullanılır.

3.1.2.3 Lazerle Yüzey Isıl İşlemi

Lazerle yüzey ısıtma işlemi geniş bir şekilde çelik ve dökme demir makine parçalarının belirli alanlarını sertleştirmek için kullanılır. Lazer ışığının emilimi sırasında oluşan ısı, ergimeye neden olmamak için kontrol edilir. Bu ısı östenitleme işleminde kullanılır. Belirli bölgenin bu işlem ile ısıtılması sonrasında, ısıtmanın yapının tamamına iletilmesi sonucu o bölgede ani soğuma (kendinden su verme) gerçekleşir ve martenzit dönüşümü gözükür. Bu işlem, lazerle yüzey ısıtmadan ayrı olarak anlaşılması için bazen lazerle dönüşüm sertleşmesi olarak da adlandırılır. Lazerle dönüşüm sertleşmesinde kimyasal bir değişim yoktur. Demirli malzemeleri seçmeli olarak sertleştirmek için endüksiyon ve de alevle sertleştirme gibi etkili bir yöntemdir.

3.1.2.4 Elektron Demeti ile Sertleştirme

Lazer işlemi gibi bu işlem de çeliklerin yüzeylerini sertleştirmek için kullanılır. Elektron demeti ile ısıtma işlemde, yüksek hızda konsantre elektronlar, demirli parçaları ısıtmak için ısı kaynağı olarak kullanılırlar. Elektronlar, bir elektron demeti tabancası ile hızlandırılıp bir demet şekline getirilirler. Tabancadan çıkınca elektronlar bir odaklama bobininden geçerler, bu bobin demet yoğunluğu seviyesini (spot büyüklüğünü) ayarlar ve bundan sonra yönlendirme bobininden geçerler. Elektron demeti elde etmek için, elektronların elde edilip hızlandırıldıkları yerde 10^{-5} torr (1.3x10⁻³ Pa) yüksek vakum gerekmektedir. Bu vakum, yayıcının oksitlenmesini ve de elektronların nispeten düşük hızda giderlerken saçılmalarını engeller.

3.1.2.5 İyon İmplantasyonu

İyon implantasyonu (nakli), çok yüksek enerjili iyonların alt tabaka malzemesi içine gönderildiği yüzey değişikliği işlemidir. Neredeyse tüm atomların iyonları nakledilebilirler, ama azot, korozyon direnci ve de tribolojik özellikleri geliştirmesinden dolayı çelikler ve diğer alaşımlarda sıkça kullanılır. Alaşımların yüzeylerindeki azot içeriği hem azot iyon implantasyonu hem de plazma nitrürleme

ile arttırılabilir fakat yapılan işlem ve de yüzeydeki değişiklikler farklı olur. Aynı zamanda iyon implantasyonunun en büyük farkı, oda sıcaklığında yapılabilmesidir.

3.1.2.6 Tercihli Karbürleme

Bir parçanın belirli bölümlerinde karbürlemeyi engellemek gerekirse, durdurucu (stopoff) bileşikler veya bakır kaplama kullanılabilir. Karbürlemeyi durdurmak temizliğe ve işleme tarzına dikkat etmek, istenilen durmayı sağlamak için gereklidir. En az 0.03 mm kalınlıkta bakır kaplama gereklidir. Durdurucu bileşikler patentlidir ve de kullanım talimatlarına sıkı uyulması gerekir çünkü yüzde yüz durdurmayı sağlamak zordur. Karbürlemenin engellemesi, ısıtma işlem sonrası makinada işlenecek bölümlerde veya ince bir bölümün tüm kesit boyunca karbürleşip kırılğan yapı oluşturacağı durumlarda gereklidir.

3.1.2.7 Ark Lambaları ile Yüzey Sertleştirme

Ark lambaları ile yüzey sertleştirme yöntemi, yüzeyin yeniden ergitilmesi veya yüzeyde katı fazda yeniden kristalleşme ile sertleştirme gibi uygulamalarda kullanılır. Örnek olarak, dökme demirlerin yeniden ergitilmesi ve azot veya metan ortamında, yüzeyde titanyum karbür oluşturmak için titanyumun geniş alanlı olarak yeniden ergitilmesi verilebilir. Dökme demirlerin yeniden ergitilmesinde lazerler de kullanılır. Ark lambalarının uygulama bulduğu başka bir alan ise tarla sürmekte kullanılan tarım cihazlarındaki bıçaklarının uçlarının seçmeli sertleştirilmeleridir.

3.1.3 Difüzyon ve Tercihli Sertleştirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması [23]

En yaygın yüzey sertleştirme yöntemlerinin faydaları Tablo 3.3'te karşılaştırılmışlardır. Alev ve endüksiyon ile sertleştirme, genel olarak orta karbonlu çelikler, orta karbonlu alaşımlı çelikler, kimi dökme demirler ve düşük alaşımlı takım çelikleri ile sınırlıdır. Alevle sertleştirmede boyut sınırı yoktur çünkü sadece sertleştirilmesi istenilen kısmın ısıtılmaya ihtiyacı vardır. Endüksiyon sertleştirmesinde, sertleştirilecek kısmın endüktör bobin içine sığması gerekmektedir. Alevle sertleştirme genelde derin sertleştirmeler (1.2 – 6 mm arası) için kullanılır. Alevle ince sertleştirme yapmak, ısıtma işleminin doğasından dolayı zordur. Difüzyon yöntemleri 'de karşılaştırılmışlardır.

Dönüşüm sertleştirmeleri, yorulma direncini arttıran sıkıştırıcı kalıcı gerilmeler oluştururlar. Tercihli sertleştirmelerde ise sertleştirilen alanın sertleştirilmeyen alan ile temas ettiği bölümde kalıcı çekme gerilmeleri görülür. Bu nedenle alev ve endüksiyon gibi seçici sertleştirme yöntemlerinde, sertleştirilecek bölümün geometrik durumuna dikkat etmek ve tercihen gerilimlerden uzak yerlerinde uygulamak lazım. Hem nitrürleme hem de karbürleme yüzey yorulmasına iyi direnç gösterirler ve dişli ve kamlarda sıkça kullanılırlar.

Tablo 3.3: En yaygın beş yüzey sertleştirme işleminin karşılaştırmalı faydaları [23]

İşlem	Faydalar
Karbürleme	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (orta derinlikte sertlik), temas yüklemesi için mükemmel kapasite, iyi bükme yorulması dayanımı, iyi yapışma direnci, su vermede kırılmaya mükemmel direnç, düşük-orta fiyatlı çelikler gerekli, yüksek sermaye gerekli
Karbonitrürleme	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (düşük derinlikte sertlik), temas yüklemesi için orta kapasite, iyi bükme yorulması dayanımı, iyi yapışma direnci, iyi boyutsal kontrol, su vermede kırılmaya mükemmel direnç, düşük fiyatlı çelikler tatmin edici, orta sermaye gerekli
Nitrürleme	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (düşük derinlikte sertlik), temas yüklemesi için orta kapasite, iyi bükme yorulması dayanımı, mükemmel yapışma direnci, mükemmel boyutsal kontrol, su vermede kırılmaya iyi direnç (önişlem sırasında), orta-yüksek fiyatlı çelikler gerekli, orta sermaye gerekli
Endüksiyonla Sertleştirme	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (yüksek derinlikte sertlik), temas yüklemesi için iyi kapasite, iyi bükme yorulması dayanımı, orta yapışma direnci, orta boyutsal kontrol, su vermede kırılmaya orta direnç, düşük fiyatlı çelikler tatmin edici, orta sermaye gerekli
Alevle Sertleştirme	Sert, yüksek aşınma dirençli yüzey (yüksek derinlikte sertlik), temas yüklemesi için iyi kapasite, iyi bükme yorulması dayanımı, orta yapışma direnci, orta boyutsal kontrol, su vermede kırılmaya orta direnç, düşük fiyatlı çelikler tatmin edici, düşük sermaye yatırımı gerekli

3.1.4 Termal Sprey Kaplamalar [5]

Termal sprej kaplama işlemi, maliyet, malzeme türleri ve uygulama şekilleri açısından en geniş seçeneklere sahip modern yüzey işleme yöntemidir. Termal sprej işlemi, yüksek performanslı malzemelerin, çok kısa süre içerisinde, birkaç mikrometreden 25 mm üzerine kadar değişik kalınlıklarda, çok çeşitli boyut ve

geometrideki parçalara kaplanmasını sağlar. Termal spreyleme, taban metalde minimum derecede ön hazırlığa ihtiyaç duyar, parçanın kullanıldığı yerde uygulanabilir, kaynakla örten tabaka gibi yöntemlerle karşılaştırıldığında düşük sıcaklıkta ($>95^{\circ}\text{C}$) uygulanan bir yöntemdir. Tipik uygulama alanları: piston yayları, mil yatakları, konveyörler, forklift kaldırıcı uçları, ekstrüzyon kalıpları, transformatörler, gemi omurgaları, gemi tanker bölümleri ve asma köprülerdir.

Termal spreyleme, aşınma ve korozyonu azaltarak, düşük maliyetli taban malzemesi üzerine yüksek performanslı kaplama malzemesi kullanımına izin verdiği için parçaların kullanım ömürlerini oldukça artırır. İşlemin kullanım alanları aşağıdaki gibi kategorilere ayrılabilir:

- Aşınma direnci
- Oksidasyon direnci
- Korozyon direnci
- Boyutun düzeltilmesi
- Aşındırılabilir temizlik kontrolü
- Termal bariyerler
- Elektriksel iletkenlik veya yalıtkanlık
- Biyomedikal

Tüm termal spreyleme işlemleri üç temel operasyon mekanizmasına dayanır:

- Kaplama malzemesinin, tel veya toz halinden, eriyik veya plastik hale ısıtılması
- Isıtılmış malzemenin parçalarının püskürtülmesi
- Malzemelerin ana yapıya çarpıp hızlı soğuyarak birbirine ve de alt tabakaya yapışması, böylece yoğun, fonksiyonel ve koruyucu bir kaplamanın oluşması

Parçacıklar alt tabakaya mekanik olarak, bazen de metalurjik olarak bağlanırlar. Parçacık hızı, alt tabakanın pürüzlülüğü, parçacık boyutu, malzeme kimyası, parçacık

sıcaklığı ve alt tabaka sıcaklığı, kaplama malzemesinin bağlanma gücünü etkiler. Sadece oksifuel tel sprej yöntemiyle sınırlı kaldığı ilk zamanlarda, bu yöntemin adı alevle sprejleme, metal sprejleme, alevle kaplama veya metalleştirme olarak geçerdi.

3.1.4.1 Termal Sprej Prosesleri

Günümüzde termal sprej beş ticari yöntemi kullanılmaktadır:

- Oksifuel tel (OFW) sprej
- Elektrik ark tel (EAW) sprej
- Oksifuel toz (OFP) sprej
- Plazma ark (PA) toz sprej
- Yüksek hızda oksifuel (HVOF) toz sprej

Uygun termal sprej yönteminin seçimi

- İstenilen kaplama malzemesi
- Kaplama performansı ihtiyaçları
- Maliyet
- Parça boyutu ve taşınabilirlik, göz önüne alınarak belirlenir.

Termal sprej kaplamalar için aşınma uygulamaları, adhezif aşınma, abrazif aşınma ve yüzey yorulması şeklinde kategorilere ayrılabilir.

3.1.4.2 Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, iki yüzey birbirine karşı kasıtlı olarak kayma hareketi yaptığında, bir yüzeyden diğer yüzeye parçaların yapışması şeklinde gözükür. İki malzemenin yakın temasa geçmesiyle oluşan yapışma kuvvetlerinden dolayı oluşur. Genelde yağlanmanın yeterli olmadığı durumlarda oluşur ve genelde sürtünme yapışması denen metal transferine sebep olur.

Yumuşak yatak kaplamaları abrazif parçaların yapıya gömülmesine ve de yatak yüzeylerinin hizalanması için deformasyona izin verir. Yeterli miktarda yağlamaya gerek vardır. Ana malzeme yerine bu kaplamalar aşınırlar, o yüzden genelde düşük maliyetlidirler.

Sert yatak kaplamaları adhezif aşınmaya oldukça yüksek dirençlidirler. Gömülebilirlik ve kendinden hizalanmanın önemli olmadığı ve de yağlamanın istenmediği durumlarda kullanılırlar.

Adhezif aşınmaya dayanıklı kaplamalar için uygulamalar ve de tavsiye edilen malzemeler Tablo 3.4'te listelenmişlerdir.

3.1.4.3 Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, sürtünen yüzeyler arasında metal parçaları, metalik oksitler ve toz gibi yabancı sert parçacıklar bulunduğu zaman oluşur. Bu parçacıklar tüm yüzeylerden malzeme aşındırırlar. Bu uygulamalar için kaplama malzeme seçimi, çalışma sıcaklığı ve de gerekli yüzey pürüzlülüğü değerine bağlıdır. Aşağıdaki performans faktörlerine dikkat edilmesi gerekmektedir.

- Kaplama sert olmalıdır. Özellikle, yüzey sertliği, mevcut abrazif tanelerin sertliğinden yüksek olmalıdır.
- En yaygın abrazif silikadır (kum), yaklaşık sertliği 820 HK'dır. (Karşılaştırma için, tungsten karbür/kobalt kompoziti 1400-1800 HK, Al_2O_3 yaklaşık 2100 HK)
- Abrazif hakkında bilgiler (ne kadar sıklıkta yenilenir, sivri ve kırılğan mı, nasıl kırılır) kaplama seçmekte ve de performansı hakkında tahmin yürütmede önemlidir.
- Eğer sistem kapalı ise, aşınma ile oluşan parçacıklar da aşınma hızına etki ederler ve de göz önüne alınmaları gerekir
- Kaplama, çalışma sıcaklıklarında oksidasyon direnci sunmalıdır

Abrazif taneciklere dayanıklı kaplamalar için uygulamalar ve de tavsiye edilen malzemeler Tablo 3.4'te listelenmişlerdir.

3.1.4.4 Yüzey Yorulma Aşınması

Tekrarlı yükleme ve boşaltma, yüzeyde periyodik gerilime yol açar ve sonunda yüzeyde veya yüzey altında çatlaklara yol açar. Yüzey en sonunda kırılır ve de büyük parçalar halinde malzeme kaybı olur. Bu olay sadece ahdezif ve abrazif aşınmanın görülmediği, örneğin yüksek yüzey temas yüklerinin bulunduğu sistemlerde gözükür. Sabit parçacık kaybı olmadan yüzeyin bir alanı tekrarlı olarak gerilime uğratılırsa yorulma hasarı gözükür. Sürtme, erozyon ve kavitasyon bu tip aşınmanın tipik örnekleridirler.

Sürtme aşınmasının olacağını sezmek zordur, çünkü kasıtlı hareketin bulunmadığı sistemlerde olur. Genelde sürtmenin sebebi titreşimdir. Sürtmeye dirençli kaplamalarla için aşağıdaki performans faktörleri geçerlidir:

- Kaplama, çalışma sıcaklığında oksidasyona dirençli olmalıdır. Oksit meydana geliyorsa, tok ve sıkıcı yapışan olmalıdır, zayıf yapışan bir oksit, ciddi abrazif aşınmaya sebep olur
- Gerilimsiz, özellikle de çekme gerilimsiz bir yüzey tercih edilir. Yüksek büzülme gösteren kaplamaların yüksek yüzey gerilimleri vardır ve de düşük gerilimli kaplamalar kadar iyi çalışmazlar.
- Kırılgan kaplamalar hızla bozulurlar. Tok kaplamalar daha uzun süre sağlam kalırlar.
- Sert parçacıkların tok matris içinde dağıtıldıkları kaplamalar genelde en dayanıklılardır.

Sürtmeye dayanıklı kaplamalar için uygulamalar ve de tavsiye edilen malzemeler Tablo 3.4'te listelenmişlerdir.

Erozyon sert parçacıklar taşıyan gaz veya sıvıların hızla bir yüzeye çarpması ile oluşur. Çarpma açısı düşük olduğunda aşınma oluşum mekanizması abrazife yakındır. Açık yüzeye dike yakınsa malzeme plastik akma veya kırılgan dağılma ile kayba uğrar. Erozyona dirençli kaplamalar için aşağıdaki performans faktörleri geçerlidir:

- Parçacığın çarpma açısı 45° 'den küçükse, seçilen kaplama daha sert ve daha abrazif aşınma dirençli olmalıdır
- Parçacığın çarpma açısı 45° 'den büyükse, seçilen kaplama daha yumuşak ve daha tok olmalıdır
- Yüksek çalışma sıcaklıklarında, kaplamaların sıcak sertlikleri yüksek olmalıdır ve de $540-815^\circ\text{C}$ arasında oksidasyona dirençli olmalıdırlar
- Taşıyıcı sıvı ise, kaplamanın korozyon direnci de göz önüne alınmalıdır

Parçacık erozyonuna dayanıklı kaplamalar için uygulamalar ve de tavsiye edilen malzemeler Tablo 3.4'te listelenmişlerdir.

Kavitasyon sıvı akışındaki kabarcıkların patlaması sonucu oluşan mekanik şoklardan oluşur. Sürtmeye dirençli malzemeler kavitasyona da dirençlidir. En etkili kaplama özellikleri tokluk, yüksek aşınma direnci ve de korozyon direncidir. Kavitasyona dirençli kaplamalar için aşağıdaki performans faktörleri geçerlidir:

- Bir kavitasyonun oluşması için bir sıvı ile metal arasında, baloncuk oluşumu ve de patlamasını içeren bir bağlı hareket olması gerekir
- Sıvılar, sprey kaplamalara nüfuz ederler, o yüzden kaplamaların ergitilerek birleştirilmeleri (fused) gerekir
- Kaplamanın seçimi, uygulamada kullanılan sıvıya direncine bağlı olmalı
- Sertlik önemli bir faktördür ama kaplamaların aynı zamanda tok olmaları gerekir. Kırılgan kaplamalar çabuk bozulurlar
- Deformasyonla sertleşebilen kaplamalar, kavitasyonların tekrarlı çarpmalarına özellikle daha çok dirençlidirler

Kavitasyona dayanıklı kaplamalar için uygulamalar ve de tavsiye edilen malzemeler Tablo 3.4'te listelenmiştir.

Tablo 3.4: Sürtünme ve aşınma uygulamaları için termal sprey uygulamaları [5]

Aşınma türü	Kaplama malzemesi	Kaplama işlemi	Uygulama
Adhezif aşınma	Yumuşak yatak kaplamaları:		
	Alüminyum bronz	OFW, EAW, OFP, PA, HVOF	Babbitt yatağı, hidrolik pres kabı, ilerletici yatak ayağı, kompresör piston kafası
	Tobin bronz	OFW, EAW	
	Babbitt	OFW, EAW, OFP	
	Kalay	OFW, EAW, OFP	
	Sert yatak kaplamaları:		
	Mo/Ni-Cr-B-Si karışım	PA	Panç pres krankmili, şeker kamışı öğütme merdanesi, dümen yatağı, küçük çark yatağı, segman, yakıt pompa rotoru
	Molibden	OFW, EAW, PA	
	Yüksek karbonlu çelik	OFW, EAW	
	Alümina/titanya	OFP, PA	
	Tungsten karbür	OFP, PA, HVOF	
	Co-Mo-Cr-Si	PA, HVOF	
	Fe-Mo-C	PA	
Abrazif aşınma	Alüminyum oksit	PA	Sulu çamur piston çubuğu, çubuk astarları, emici çubuk kuplajları (petrol sanayii), beton mikseri vida konveyörü, öğütücü çekiçler (tütün sanayii), çelik göbek (kuru hücreli piller), parlatma donanımları
	Krom oksit	PA	
	Tungsten karbür	PA, HVOF	
	Krom karbür	PA, HVOF	
	Ni-Cr-B-SiC-WC (ergitilmiş)	OFP, HVOF	
	Ni-Cr-B-SiC (ergitilmiş)	OFP, HVOF	
	Ni-Cr-B-SiC (ergitilmemiş)	HVOF	
Yüzey yorulma aşınması			
Sürtme: kasıtlı hareketli uygulamalar	Molibden	OFW, PA	Servomotor şaftları, torna ve bileylerin tam ortaları, subap iteceği, kavrama kolu, segman, silindir astarı
	Mo/Ni-Cr-B-SiC	PA	
	Co-Mo-Cr-Si	PA, HVOF	
Sürtme: küçük şiddette titreşimli uygulamalar			
Düşük sıcaklık (<540°C)	Alüminyum bronz	OFW, EAW, PA, HVOF	Uçak kanadı kapak yolları, genişleme bağlantıları (jet motoru bileşeni)
	Cu-Ni-In	PA, HVOF	
	Cu-Ni	PA, HVOF	
Yüksek sıcaklık (>540°C)	Co-Cr-Ni-W	PA, HVOF	Kompresör hava contaları, kompresör statoru , fan kanal bölümleri ve rijidite çubukları (jet motoru bileşenleri)
	Krom karbür	PA, HVOF	
Erozyon	Krom karbür	PA, HVOF	Egzos fanları, hidroelektrik valfler, siklon toz toplayıcılar, boşaltma valfleri tıpalı ve yatakları, egzos valf yatağı
	Tungsten karbür	PA, HVOF	
	WC/Ni-Cr-B-SiC (ergitilmiş)	OFP, HVOF	
	WC/Ni-Cr-B-SiC (ergitilmemiş)	OFP, HVOF	
	Krom oksit	PA	
Kavitasyon	Ni-Cr-B-SiC-Al-Mo	PA	Aşınma daireleri (hidrolik türbinler), su türbini hazneleri, su türbini nozulları, dizel motor silindir astarları, pompalar
	Ni-Al/Ni-Cr-B-SiC	PA	
	316 paslanmaz çeliği	PA	
	Ni-Cr-B-SiC (ergitilmiş)	OFP, HVOF	
	Ni-Cr-B-SiC (ergitilmemiş)	HVOF	
	Alüminyum bronz	PA, HVOF	
	Cu-Ni	PA, HVOF	

3.1.5 Elektrolizle Kaplama [5]

Sürtünmeye ve de muhtemelen aşınmaya maruz kalan bir malzemenin genellikle kaplanması gereklidir. Kaplama, çevrenin tribolojik ihtiyaçlarına uyarlanabilir ve de mukavemet veya düşük maliyet gibi özelliklere sahip taban metali seçme konusunda geniş bir seçenek sunar.

Tribolojik uygulamalarda kullanılan diğer yüzeyler gibi, elektroliz kaplamalarının da iki ana kategorileri vardır. Sert kaplamalar aşınmanın bir çok türüne direnç göstermeleri için kullanılır. Bunlar abrazif, adhezif ve erozif aşınmayı içerir. Kırılmaya direnç göstermesi için bu kaplamalarda bir miktar tokluk tercih edilir. Yumuşak kaplamalar genellikle yatak yüzeylerinde düşük kesme kuvvetleri göstermeleri için kullanılır. Bunlar çoğunlukla oda sıcaklığında ve düşük yüklerde kullanılırlar.

Kaplama seçimindeki ek bir husus, korozyon koruması sunmasıdır. Korozyon aşınmasını engellemek, bir kaplamanın koruyucu özelliklerine şiddetle ihtiyaç duyar. Çünkü korozyon kinetiğini sınırlayan ince yüzey filmi sürekli aşınarak yok olur.

Sürtünme aşınmayı kontrol için kullanılan kaplamalar, elektrokimyasal olarak, harici bir akım kullanılarak veya kullanılmayarak yüzeyde biriktirilebilirler. Harici bir akım kullanılmadan yapılan biriktirmeye akımsız kaplama denir. Birçok aşınma uygulaması için elektrokimyasal biriktirme, 10'dan 500 μm 'ye kadar kaplama yapılabilen en hızlı ve ekonomik yöntemdir.

Tüm kaplama türleri için yüzeye yapışma çok önemlidir. Yapışmanın, alt tabakanın yüzey temizliğine bağlılığından dolayı, alt tabakanın düzgün bir önışleme sokulması gereklidir.

3.1.5.1 Biriktirmenin Temelleri

Elektrolizle kaplama, elektrik iletkenliğine sahip bir yüzeyin, biriktirilecek metalin iyonlarına sahip uygun bir çözeltiye elektriksel potansiyel uygulanması ile kaplanmasıdır. Kaplanacak olan elektroda katod denir. Diğer elektrot, yani anod, çözülebilir tipte olup çözeltiye metal iyonlarını sağlayabilir. Alternatif olarak, anod çözülemeyen olabilir ve de biriktirilecek metalin iyonları çözeltiye devamlı olarak eklenerek azalan miktar yerine konmuş olur.

Biriktirme hızı, birincil olarak akım yoğunluğuna bağlıdır. Eğer sağlanan tüm iyonlar, metal iyonlarını azaltırlarsa, biriktirme hızı Faraday kanunundan hesaplanabilir. Bu kanuna göre 96.560 kulomb (1 Faraday), 1 gram eşdeğer ağırlığı (atom ağırlığı/değerlik) yüzeyde biriktirir. Fakat, hidrojen oluşumu ve de diğer ikincil reaksiyonlar, sağlanan akımın bir kısmını kullanabilirler. Bu yüzden, sağlanan elektronların sadece bir kısmı metal iyonlarının azaltılmasında kullanılırlar. Bu durumda, kaplama verimliliği %100'ün altındadır.

Tribolojik uygulamalarda kullanılıp elektrokimyasal olarak kaplanan malzemeler temel olarak krom, nikel, ayrıca değerli ve yumuşak metallerdir.

3.1.5.2 Krom

Düşük sürtünme katsayıları ve de iyi aşınma özelliklerinden dolayı sert krom kaplamalar sıkça kullanılırlar. Dekoratif kroma göre daha yüksek sıcaklıklarda ve akım yoğunluklarında biriktirilirler. Sert krom kaplama çözeltisindeki kromik asidin sülfirik aside (çözeltinin ana bileşenleri) oranı, dekoratif kaplamaların çözeltisinden daha düşüktür. Sert krom kaplamaların kalınlıkları 0,1 – 100µm arasındayken dekoratif kaplamalar genelde 0,1 – 0,2µm arasındadır. Sert krom kaplamalarda kullanılan altı değerli kromu içeren çözeltilerin atılması çok sıkı çevre yönetmelikleriyle kontrol edilmektedir. Bu yüzden, çoğunlukla üç değerli krom içeren çözeltilerle ilgilenilmektedir.

Sert krom kaplamaların sertliği Knoop ve Vickers skalasında 900 – 1100 arasındadır. Bu değerler bulk kromun sertliğinden oldukça yüksektir. Üç değerli çözeltilerden yapılan kaplamalar, altı değerlilerden yapılanlardan daha yumuşaktır. Fakat yaklaşık 700°C'de yapılan bir ısıtma işleminden sonra sert kromun sertlik değerine yakın bir değer elde edilebilir.

Kromun düşük sürtünme katsayısı ve iyi aşınma özellikleri, yüzeyde oluşan ve kendini düzeltebilen Cr_2O_3 tabakasına bağlıdır. Genel olarak, sert kromun aşınma hızı, akımlı ve akımsız nikel kaplamalardan daha düşüktür.

Korozif aşınma koşullarında, krom kaplamalar eğer yüksek iç gerilimlerden dolayı çatırlarsa alt tabakayı korumazlar.

Krom, aşınma direnci için piston ve şok emiciler gibi otomotiv ve hava araçları parçalarında geniş bir şekilde kullanılırlar. Diğer uygulamalar matkap, musluk, kalıp, ekstrüzyon vidaları ve merdanelerdeki kaplamalardır. Silah namlularının aşınma dirençleri de krom kaplama ile geliştirilebilir. Aşınmış parçaların krom kaplama ile tekrar kullanılabilir hale getirilmesi önemli bir endüstriyel uygulamadır.

3.1.5.3 Elektro-Nikel

Aşınma uygulamaları için nikel kaplama çözeltilerinin en sık kullanılanı Watts çözeltisidir. Ana bileşenleri nikel sülfat, nikel klorür ve borik asittir. Organik ilave ajanlar, tane boyutunu küçülterek sertliği ve aşınma direncini arttırabilirler. Nikel genellikle iç çekme gerilmesi ile kaplanır. Bazı kükürt bileşenleri bu gerilimin basma olmasını sağlayabilirler ama bu da kaplamayı özellikle yüksek sıcaklıklarda kırılgan yapar. Nikel sülfamat kaplama çözeltisi, düşük gerilimli kaplamalar yapar. Tungsten ve molibden gibi normalde sulu çözeltilerde tek başlarına kaplanamayacak metaller, nikelle beraber kaplanabilirler. Sert parçacıkların veya katı yağlayıcıların enklüzyonları elektrolizle kaplanmış nikel kaplamaların aşınma veya sürtünme özelliklerini geliştirebilirler.

Nikel kaplamaların sertlikleri 150 – 500 Vickers arasında olabilir. Sertlik kaplama koşullarına bağlıdır. Bunlar akım yoğunluğu, çözelti pH değeri, sıcaklığı ve de bileşimidir. Elektro-nikel kaplamaların sürtünme katsayıları ve aşınma hızları krom kaplamalardan daha yüksektir. Akımsız nikel kaplamaların ise bu değerleri biraz daha düşüktür. Elektro-nikel kaplamaların en geniş uygulaması krom için alt kaplama olmaktadır. Eğer kalın kaplamalar gerekliyse, örneğin çok ağır aşınan parçalar onarılacaksa tek başına krom kullanmak hem akım verimsizliği hem de yüksek iç gerilimlerden dolayı pratik değildir. Bu durumlarda, kaplama kalınlığının büyük çoğunluğu nikelden oluşurken krom sadece dış ince tabaka olarak kullanılır.

Korozif durumlarda, krom çatlaklardan dolayı alt tabakayı koruyamaz, ama nikel alt kaplama korur. Elektrokaplanmış sert ve aşınmaya dirençli Ni-W, Ni-Mo ve Ni-Cr alaşım uygulamaları mevcuttur. Bu alaşımlar aynı zamanda iyi korozyon koruması sunarlar.

3.1.5.4 Akımsız Nikel

Akımsız nikel için redükleme araçları sodyum hipofosfit, sodyum borohidrid veya organik aminoboranlardır. Sodyum hipofosfatın redükleyici araç olduğu zaman, kaplama genellikle %3-11 arası fosfor içerir. Akımsız nikel kaplamanın bor bileşimi, redükleme aracı aminoboran ise %0,2-4 arası, sodyum borohidrid ise %4-7 arasındadır.

Akımsız nikel ısıtılma işlemi olarak krom kaplamalar ile karşılaştırılabilecek bir sertlik elde edilebilir. Maksimum sertlik 400°C’de 1 saat veya 260°C’de 10 saat ile elde edilir. Ni-P alaşımlarının kaplama sertlikleri 500-650 Vickers arasındayken Ni-B alaşımlarının genelinde fosforlulardan daha yüksek olur. Akımsız nikel kaplamaların yüksek sıcaklıklarda sertliklerini koruma kabiliyetleri fosfor ve bor oranının artması ile artar fakat 385°C’nin üzerinde hızla azalır. Nikel-bor kaplamalar yüksek sıcaklıklardaki aşınmaya daha yüksek dayanım gösterirler, o yüzden bu koşullarda daha sık kullanılırlar.

Akımsız nikelin hem korozyon hem de aşınma direnci için en geniş kullanımı sıvı veya gazların akışını kontrol eden valflerdir. Aşınma uygulamalarındaki diğer kullanım alanları: alüminyum piston kafaları, hava taşıtları motor şaftları, hava taşıtlarının gaz türbini parçaları ve motor yuvaları, ayrıca diferansiyellerin küçük çarklarının şaftları, yakıt enjektörleri, fren diski pistonları, mafsal pimleri, hortum bağlantıları gibi otomotiv parçalarıdır.

3.1.5.5 Değerli Metal Kaplamalar

Ayrılabilir elektriksel bağlantılar sadece aşınmaya maruz kalmazlar, aynı zamanda düşük temas direnci de sunmalıdırlar. Yüksek elektriksel dirençli bir oksit yüzey tabakası oluşturmadığı için, siyanür çözeltisinden elektro-altın kaplama en geniş kullanılan yöntemdir. Yumuşak altın kaplamalar çabuk aşınırlar. Kaplama çözeltisine kobalt iyonları katmak, altının sertliğini arttırmak için en sık kullanılan yöntemdir. Fakat, kobalt eklenmesi, kaplamanın sünekliğini azaltır. Bu ektiler, tane boyutunun küçülmesine bağlı olarak oluşurlar. Paladyum, Pd-Ag ve Pd-Ni kaplamalar, temel olarak maliyet düşürmek amacı ile altının yerine kullanılmaktadırlar.

3.1.5.6 Yumuşak Metaller

Elektro-kaplanmış kalay, kurşun ve gümüş alaşımları gibi yumuşak metaller, yatak kaplamaları olarak sıkça kullanılırlar. Kalay ve gümüş kaplamalar özellikle ilk çalışma anında, sürtünme yapışmasını önlerler. Gümüşle birlikte %3.4-3.6 Pb kaplanması, yataklar için çok iyi yapışma dirençli kaplamalar sunar. Gümüş alaşımlar, yüksek sıcaklıkla katı yağlama için kullanılırlar. Ayrılabilir elektriksel bağlantılar Pb-Sn ile kaplanabilirler. Bu durumda, sürtünme, yüzeydeki yüksek dirençli tabakanın kaldırılması için kullanılır. Kurşun alaşımlı indiyum, aynı zamanda iyi korozyon direnci gösteren bir yatak kaplamasıdır. Fakat, kurşun ve kalay alaşımlarından daha pahalıdır.

3.1.5.7 Manyetik Malzemeler

Permalloy (Ni-Fe) ve çeşitli kobalt alaşımları gibi akımsız ve elektrolizle kaplanmış manyetik alaşımlar, bilgisayarlar için sabit diskler gibi gelişmiş manyetik depolama teknolojilerinde kullanılırlar. Amorf ve de o yüzden manyetik olmamasını sağlayacak kadar yeterince yüksek fosfor (>%7) içeren akımsız nikel kaplama, manyetik kaplamalar için bir alt tabaka olarak kullanılır. Kafanın veya disk malzemesinin aşınmasını sınırlamak gerektiği için, depolama disklerindeki çok ince manyetik tabakanın üzeri, ince aşınmaya dirençli ve/veya kaygan bir tabaka ile kaplanır. Kaplama aynı zamanda korozyon direnci de sağlar. Sert kroma benzer özelliklere sahip elektro-kaplama rodyum, genellikle bu amaç için kullanılır.

3.1.6 PVD ve CVD Kaplama [5]

Buhar biriktirme prosesleri temel olarak iki türe ayrılırlar.

- *Fiziksel buhar biriktirme (PVD) prosesi*, metal buharlarının oluşturulmasını (buharlaştırma, püskürtme veya lazerle eritme ile) ve ardından bu buharların bir alt tabaka üzerine yoğunlaştırılıp kaplama oluşumunu kapsar.
- *Kimyasal buhar yoğunlaştırma (CVD) prosesi*, katı bir malzemenin buhar fazından, genellikle ısıtılmış bir alt tabaka üzerine, çeşitli kimyasal reaksiyonlar sonucu biriktirilmesidir.

Genelde, CVD proseslerinin, iyi püskürtme gücü avantajları vardır. PVD proseslerinin ise biriktirme hızları genelde daha yüksektir.

3.1.6.1 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) Prosesi

Temel PVD prosesleri iki kategoriye ayrılır: (1) püskürtme ve (2) buharlaşma. PVD teknikleri, dekoratif uygulamalardan yüksek sıcaklıkta süperiletken tabakalara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kaplama kalınlıkları angstromlardan milimetrelere kadar değişir. Çok yüksek bir kaplama hızı ($25\mu\text{m/dk}$), elektron demetiyle ısıtılmış kaynakların gelişmesi sayesinde elde edilebilmektedir.

Püskürtme, katı veya sıvı hedefe endirek enerjik fırlatma ile yüzey atomları veya moleküllerinin çıkartılması ile sonuçlanan momentum transferidir. Püskürtme biriktirmesi prosesinde, hedef (kaplama malzemesi kaynağı) ve de alt tabaka malzemesi vakum odasına konulur ve de 13'den 0.013mPa ($0.1 \cdot 10^{-4}$ torr) basınçlara maruz bırakılır. Püskürtme kaplaması prosesinin bir diyagramı Şekil 4.x'te gösterilmiştir. Hedef (katod da denir) negatif gerilim kaynağına bağlıdır ve alt tabaka genelde hedefe yönelir.

Buharlaştırma prosesinde, buharlar, çeşitli yöntemlerle ısıtılan bir kaynakta bulunan malzemeden üretilir. Proseste, istenilen malzemeyi buharlaştıran bir buhar kaynağı kullanılır, alt tabaka malzemesi, buhar kaynağına bakacak şekilde uygun bir mesafede tutulur. Direnç, endüksiyon, ark, elektron demeti veya lazerler, buharlaştırma için muhtemel ısı kaynaklarıdır. Buharlaşma $10^{-5} - 10^{-10}$ tor arasında basınçlarda gerçekleştirilir.

3.1.6.2 Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Prosesi

Kimyasal buhar biriktirme prosesleri, çok çeşitli element ve bileşiklerin yüksek saflıkta kaplanmasına imkan verdiği için endüstride geniş bir şekilde kullanılmaktadır. CVD, gaz fazındaki kimyasal reaktanların bir reaksiyon kabına transferi ve ısı ile (klasik CVD) veya diğer araçlarla (plazma veya lazer ile CVD) aktifleştirilerek alt tabaka malzemesi üzerinde katı bir tabaka oluşturacak reaksiyonlara girmesidir. Bu proses ile, karışık şekilli parçalarda bile sabit kalınlıkta ve düşük poroziteli kaplamalar yapmak mümkündür. CVD uygulamalarının en yaygın görüldüğü alanlardan biri mikroelektroniktir. Aynı zamanda aşınma ve

yüksek sıcaklıkta oksidasyona karşı koruma gereken uygulamalarda da kullanılmaktadır.

3.1.6.3 Aşınma Uygulamaları

PVD ve CVD prosesleri ile oluşturulan sert kaplamalar, iyi aşınma dirençleri ile birlikte düşük sürtünme katsayıları sunmaktadırlar. Bu kaplamalar temel olarak basit elementlerin veya alaşımların karbürleri, nitrürleri, oksitleri ve borürleridirler. Bunlar TiN, TiC and Al₂O₃ gibi basit bileşikler olabildikleri gibi, (TiAl)N ve Ti(CN) gibi kompleks bileşikler ve TiC/Al₂O₃/TiN gibi çok tabakalı kaplamalar olabilirler.

3.2 Klasik Isıl İşlemler İle Çeliklerin Sertleştirilmesi

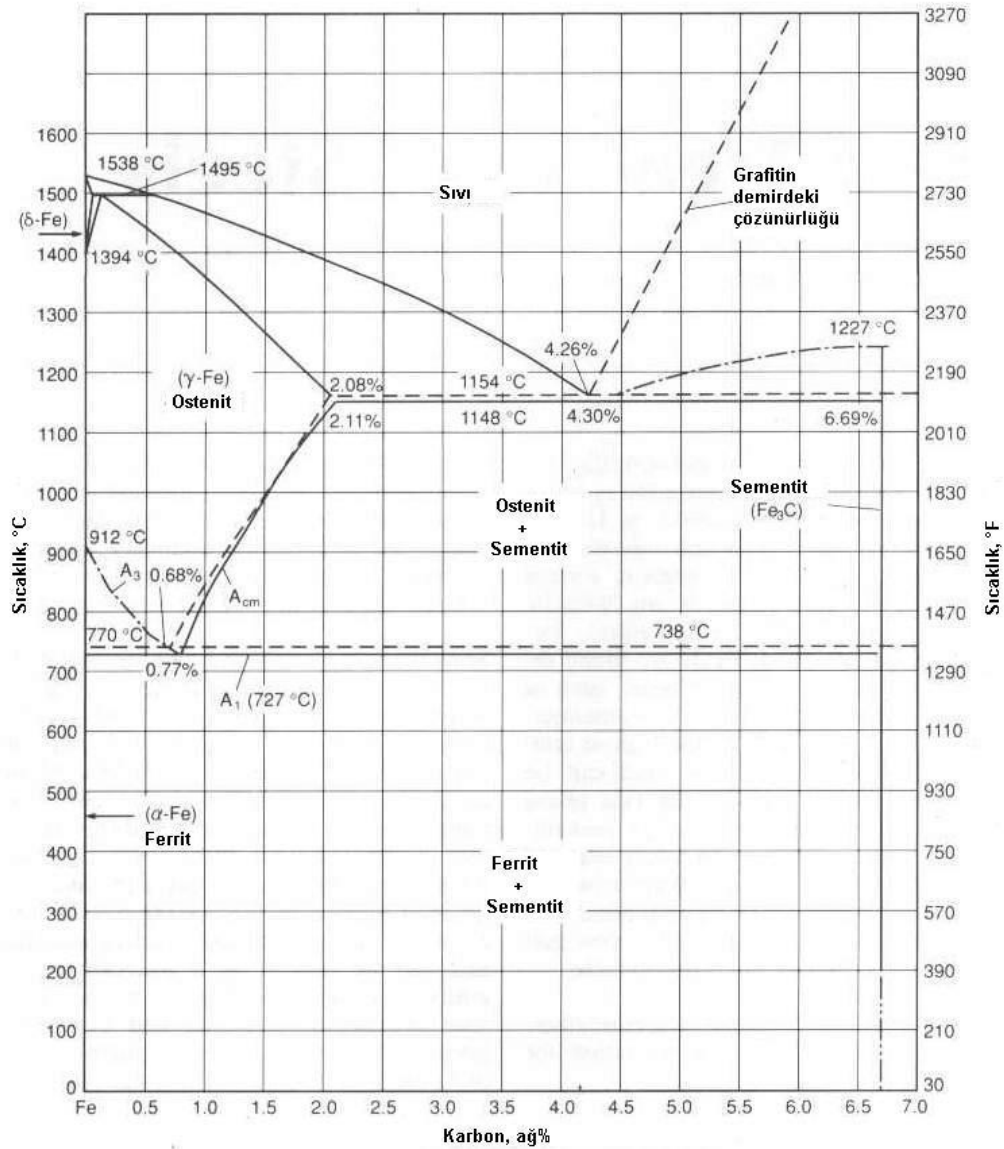
Çelik, genellikle ağırlık olarak %2'ye kadar karbon içeren demir ve karbon alaşımı olarak tanımlanır. Diğer alaşım elementleri, düşük alaşımlı çeliklerde %5 ağırlığa kadar, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi yüksek alaşımlı çeliklerde ise daha yüksek oranlarda bulunurlar. Çelikler, kimyasal bileşimlerine ve de ısıl işlemlere göre değişen faz ve mikrobileşenlerine bağlı olarak çok çeşitli özellikler gösterirler [23].

Bir önceki bölümde anlatılan difüzyon, alev, endüksiyon ve kaplama gibi yöntemlerin yanı sıra, klasik ısıl işlem yöntemleri ile de çeliklerin sertleştirilip aşınma dirençlerinin belirli koşullar için geliştirilmeleri mümkündür [24] Çeliğin sertleştirme veya su verme ısıl işlemi, çeliğin ostenit fazı sahasından itibaren, kritik soğuma hızından daha yüksek bir hızla soğutulması ile ötektoid reaksiyon oluşumunun engellenmesi sonucu yapıda martenzit fazı meydana getirilmesi esasına dayanır. Isıl işlemin Türk standartlarındaki (TS 1112) tanımı ise, katı haldeki metal veya alaşımlara belirli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, yerine göre birbiri peşine zamanlanarak uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri olarak verilmektedir [25].

3.2.1 Fe-C Faz Diyagramı [23]

Çeliklerin ısıl işlemlerini anlamamanın temeli Fe-C faz diyagramıdır (Şekil 3.4). Şekil 3.4 aslında iki diyagram gösterir: kararlı demir-grafit diyagramı (kesikli çizgiler) ve

yarı-kararlı Fe-Fe₃C diyagramı. Kararlı durum genellikle oluşmak için çok uzun zamana ihtiyaç duyar, özellikle düşük sıcaklık ve düşük karbon içeriği bölgesinde. Bu yüzden yarı-kararlı diyagram asıl ilgi konusudur. Fe-C diyagramı, denge (veya yarı-denge) durumunda, farklı karbon bileşimleri ve sıcaklıklar için hangi fazların beklendiğini gösterir. Tablo 3.5 önemli metalurjik fazlar ve mikrobileşiklerin özetini verir. Faz diyagramının düşük karbonlu tarafında ferrit (α -demir, en fazla 727°C'de ağırlıkça %0.028 çözünebilir) ve östenit (γ -demir, en fazla 1148°C'de ağırlıkça %2.11 çözünebilir) dikkat çeker. Karbonca zengin tarafta ise sementit (Fe₃C) bulunur. Yüksek alaşımlı çelikler dışında pek ilgilenilmeyen bir faz olan δ -demir, yüksek sıcaklıklarda gözükür.



Şekil 3.4: Fe-C denge diyagramı. Düz çizgiler Fe-Fe₃C diyagramını, kesikli çizgiler demir-grafit diyagramını belirtir. [23]

Tablo 3.5: Önemli metalurjik fazlar ve mikroçerikler [23]

Faz (mikroçerik)	Fazın kristal yapısı	Özellikleri
Ferrit (α -demir)	Hacim merkezli kübik	Yumuşak, düşük sıcaklık, kararlı denge fazı
δ -ferrit (δ -demir)	Hacim merkezli kübik	α -demir ile izomorfik, yüksek sıcaklık, kararlı denge fazı
Ostenit (γ -demir)	Yüzey merkezli kübik	Yumuşak, orta sıcaklık, kararlı denge fazı
Sementit (Fe_3C)	Kompleks ortorhombik	Sert yarı-kararlı faz
Grafit	Hekzagonal	Kararlı denge fazı
Perlit		Yarı-kararlı mikroçerik, ferrit ve sementitin lameller şeklinde karşımı
Martenzit	Hacim merkezli tetragonal (ferrit içinde karbonun süperdoyurulmuş çözeltisi)	Sert yarı-kararlı faz, $C < \%0.6$ ise sivri morfoloji, $C > \%1.0$ ise tabaka morfoloji, aralarında ise karşımı
Beynit		Sert yarı-kararlı faz. Çok küçük taneli, lamelsiz, ferrit ve sementit karşımı. Yüksek sıcaklıklarda oluşan üst beynit tüyümsü yapıda, düşük sıcaklıklarda oluşan alt beynit iğnemsî yapıda. Oluşma sıcaklığının düşmesi ile beynit sertliği artar.

3.2.2 Sertleştirme İşlemi

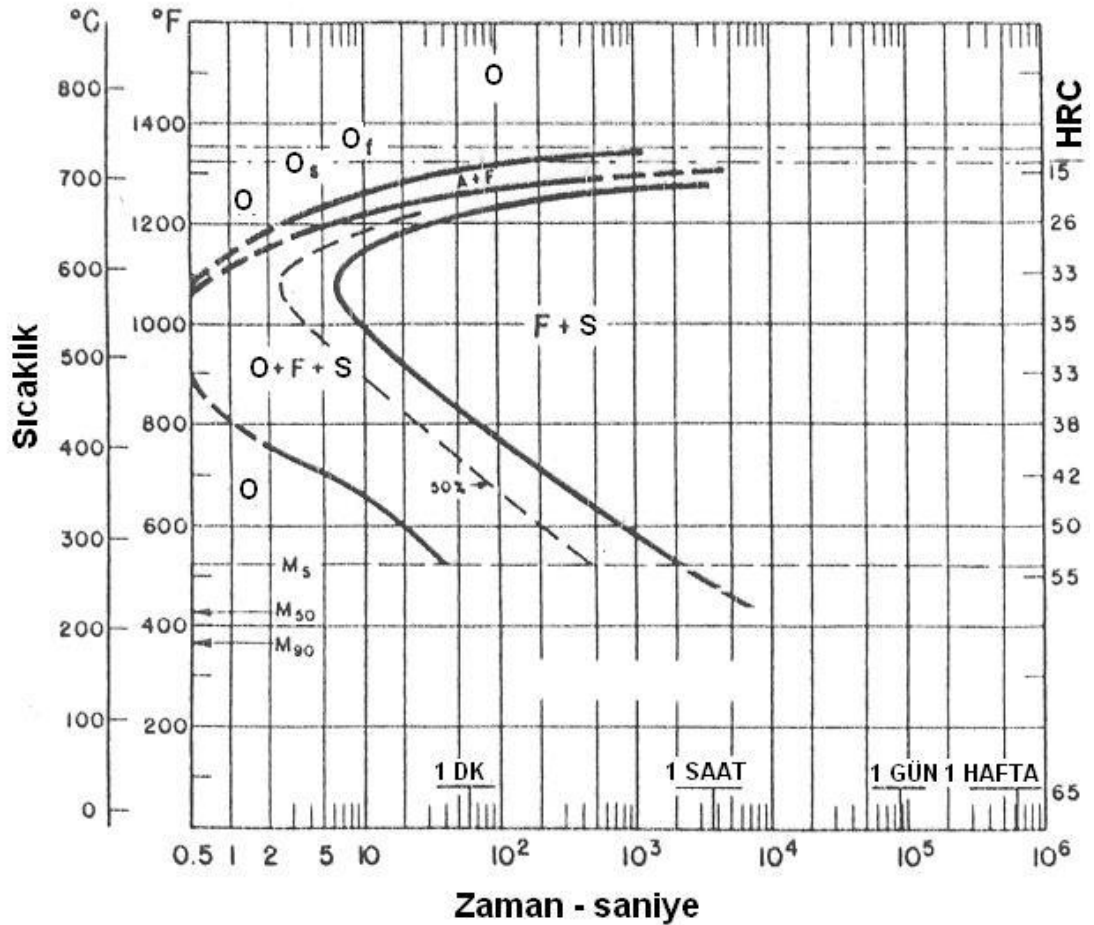
Isıl işlemle çeliğin sertleştirilmesi, martenzitik bir yapı oluşturularak dönüşüm sertleştirilmesi yöntemiyle yapılır. Dönüşüm sertleştirilmesi uygulamak için ötektoid altı çelikler A_3 ve ötektoid üstü çeliklere A_1 sıcaklığının üzerinde ostenitleştirme yapıldıktan sonra, üst kritik soğuma hızı aşılacak şekilde soğutma (ani soğuma) yapılır. Özellikle stabil karbür teşekkül ettiren alaşım elemanları (örneğin Cr, Mo, W, V) ostenitleştirme sıcaklığını yükseltirler ve kritik soğuma hızını düşürürler (Mn ve Cr kritik soğuma hızının düşmesinde çok etkilidirler) [26].

Soğutma ortamı olarak en çok su ve yağ ile özel durumlarda hava kullanılır. Perlit teşekkülü sahasında en yüksek soğutma etkisini gösteren, fakat düşük sıcaklıklarda daha yavaş soğutma hızı sağlayan soğutma ortamı, en uygun ortam sayılır. Alaşımsız

eliklerde kritik soğuma hızının oldukça yüksek olmasından dolayı, bu tür çelikler için soğutma ortamı olarak daha çok su kullanılır [26].

Malzemenin çekirdeğindeki sertlik, cidarla yaklaşık olarak aynı ise, bu tarz sertleştirme tam sertleştirme ya da normal sertleştirme olarak belirtilir. Buna karşılık martenzit oluşumu yalnızca parçanın cidar bölgesinde belirli bir derinliğe kadar sınırlı kalırsa, yüzey sertleştirme ya da cidar sertleştirme olarak belirtilir [26].

Malzemeyi ostenit sıcaklığı üzerine çıkartıp belirli bir hızda soğutarak, dönüşüme bağlı olarak yapının ne duruma geleceğini eşsıcaklık dönüşüm diyagramlarından görebiliriz. 816°C’de ostenitlenmiş bir SAE1060 eliėi için eşsıcaklık dönüşüm eğrisi Şekil 3.5’te verilmiştir [27].



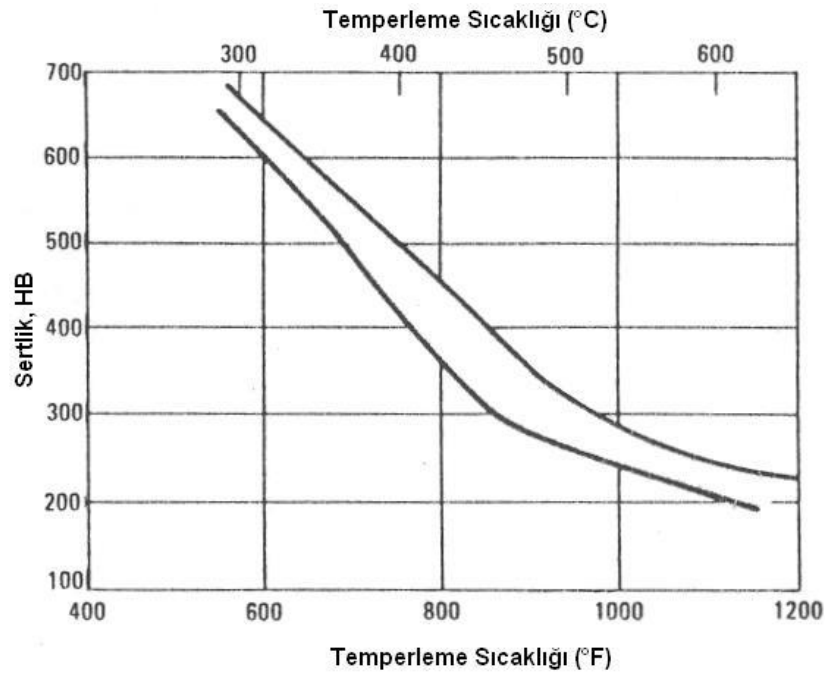
Şekil 3.5: 816°C’de ostenitlenmiş SAE1060 eliėi için eşsıcaklık dönüşüm diyagramı [27]

3.2.3 Temperleme İşlemi

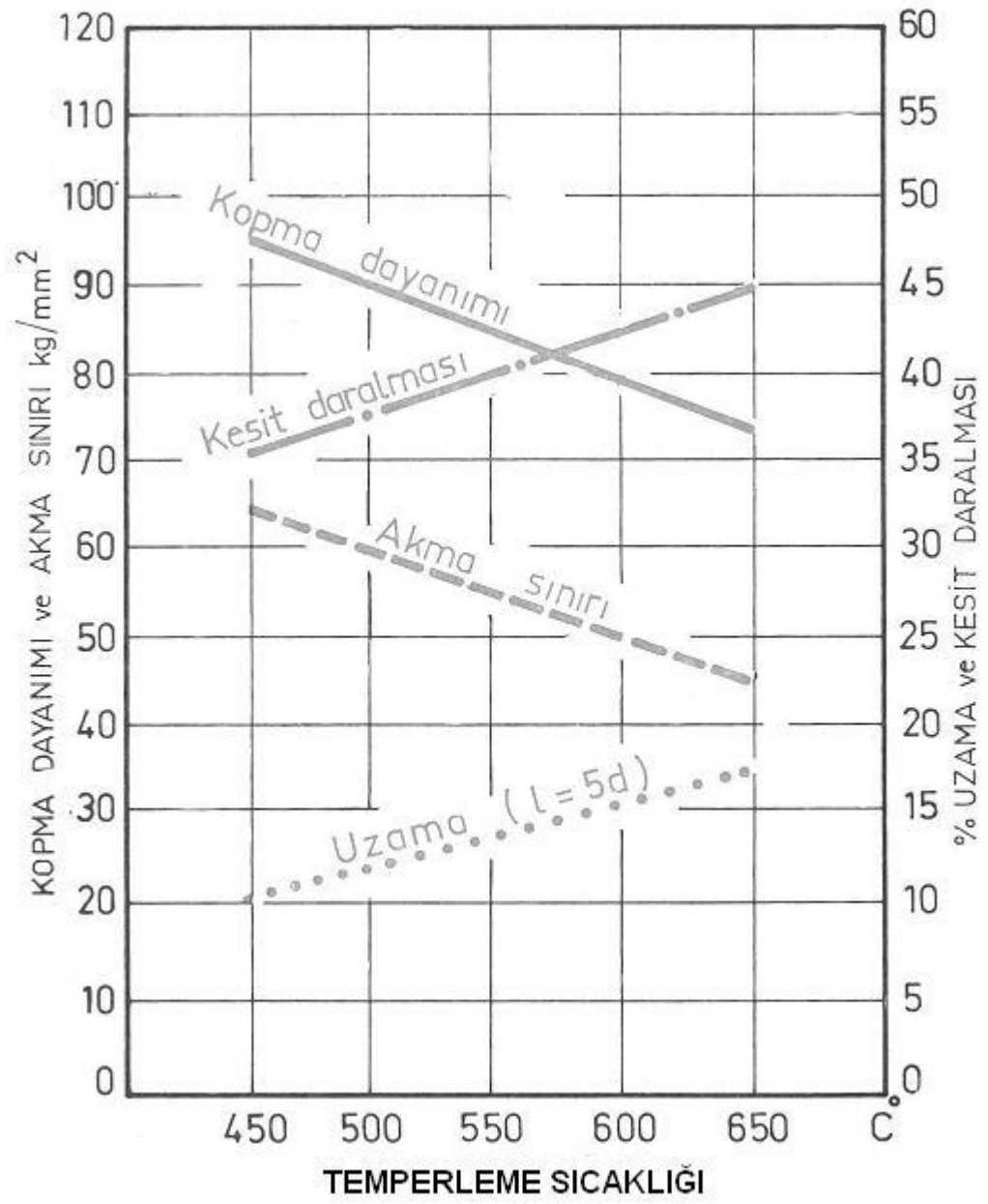
Ani soğutma ile sertleştirilmiş çelik parçalarda, martenzit oluşumundan dolayı büyük gerilmeler mevcuttur. Sertleştirilmiş parçalar 100 ile 670°C arasında ısıtılarak bu gerilmeler giderilir ya da tehlikeli olmayan seviyeye indirilir. Ancak bu esnada martenzitin sertliğinde önemli miktarda düşme olur [26].

Sertleştirme esnasında olduğu gibi temperleme esnasında da atom kafesinde önemli değişimler olur. Ostenitte çözülmüş karbon, ani soğutma sonucunda kafesi terk edemez ve martenzitik yapı içerisinde sıkışmış olarak kalır. Temperleme esnasında, ısıtma suretiyle martenzit içerisindeki karbona hareketlilik kazandırılır ve martenzitin aşırı doymuş yapısından karbür olarak ayrışır. Ayrıca sertleştirme işleminde oluşan artık ostenit de, ana yapıda çözülmüş alaşım elementleriyle birlikte karbür ayrışmasına katkıda bulunur ve martenzit parçalanır [26].

Sertleştirilmiş çelikler temperlendiğinde, çekme dayanımı ve akma sınırı, sertlikle birlikte düşer. Buna karşın malzemenin şekil değişebilirlik karakteristikleri olan kopma uzaması, kesit daralması ve çentik darbe dayanımı, temper sıcaklığı arttıkça artar [26]. Su verilip sertleştirilmiş SAE1060 çeliğinin temper sıcaklığına bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişimler Şekil 3.6 ve 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.6: SAE1060 çeliğinin temperleme sıcaklığına bağlı olarak sertliğinde meydana gelen değişim [28]



Şekil 3.7: SAE1060 çeliğinin temperleme sıcaklığına bağlı olarak mekanik özelliklerindeki değişimler [29]

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Kullanılan Malzeme ve Cihazlar

4.1.1 Kullanılan Çelik Malzemeler

Erozif aşınma deneylerinde ticari HARDOX400 ve HARDOX500, AISI1060 çelikleri kullanılmıştır. HARDOX400 ve HARDOX500, İsveç'te SSAB Oxelösund firması tarafından üretilen, özel aşınma levhalarıdır. Aşınmanın sıkça görüldüğü damper kasaları, kırıcılar, konteynerler, çekiçli değirmenler, ekskavatörler, kepçeler ve yıkım çeneleri gibi makine parçalarında uzun yıllardır kullanılmaktadırlar.

AISI1060 çeliği, Erdemir tarafından sıcak haddeleme ile üretilmiş, % 0,63 karbon içeren, yüksek mukavemetli levhalardır ve yüksek mukavemetli makina parçaları imalatında kullanılma amaçlı üretilmiş bir çelik malzemedir.

Bu çeliklerin kimyasal bileşimleri Tablo 4.1'de, mekanik özellikleri Tablo 4.2'de ve mikroyapıları HARDOX400 için Şekil 4.1'de, HARDOX500 için Şekil 4.2'de ve AISI1060 için Şekil 4.3'de gösterilmiştir.

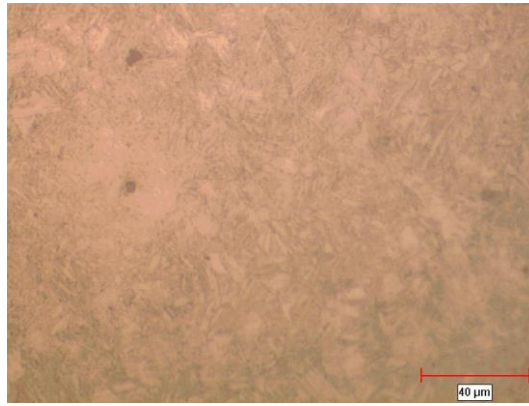
Şekil 4.1'de görüldüğü gibi HARDOX400 martenzitik yapıdadır. Şekil 4.2'deki HARDOX500 de martenzitik yapıda bir malzemedir, fakat iğne şeklindeki martenzit yapısı HARDOX400'e göre daha sıkıdır. Bu farklı mikroyapı malzemenin sertlik değerini yükseltmektedir. Son olarak Şekil 4.3'de gösterilen orjinal haldeki AISI1060 çeliği ferritik ve perlitik bir yapıya sahiptir. Bu yüzden martenzitik HARDOX çeliklerinden daha yumuşak ve daha sünektir.

Tablo 4.1: Çalışmalarda kullanılan çelik malzemelerin kimyasal bileşimleri ve karbon eşdeğerleri

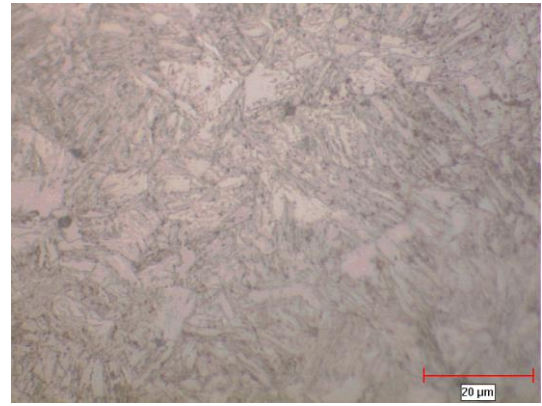
Çelik Malzemeler	% ağırlık									
	C	Si	M	P	S	Cr	Ni	Mo	B	CEV
HARDOX400	0,14	0,70	1,60	0,025	0,010	0,30	0,25	0,25	0,004	0,33
HARDOX500	0,27	0,70	1,60	0,025	0,010	1,00	0,25	0,25	0,004	0,58
AISI 1060	0,63	0,25	0,84	0,009	0,005	0,015	0,031	0,003	-	0,78

Tablo 4.2: Çalışmalarda kullanılan çelik malzemelerin mekanik özellikleri

Çelik Malzemeler	Sertlik değeri (Brinell)	Akma mukavemeti (N/mm ²)	Çekme mukavemeti (N/mm ²)	Kopma uzaması (%)
HARDOX400	415	1000	1250	10
HARDOX500	477	1300	1550	8
AISI1060	229	420	779	18

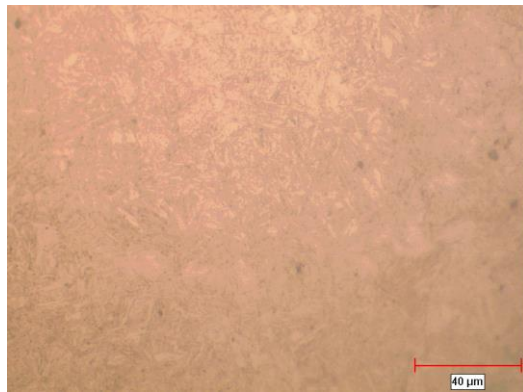


(a)

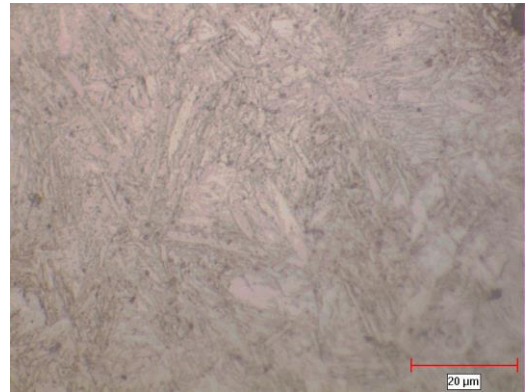


(b)

Şekil 4.1: HARDOX400'ün ışık mikroskobunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.

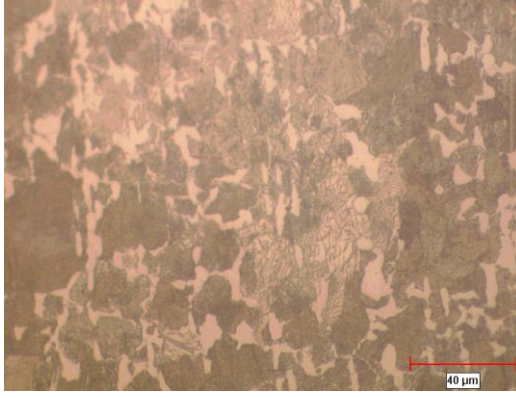


(a)



(b)

Şekil 4.2: HARDOX500'ün ışık mikroskobunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.



(a)

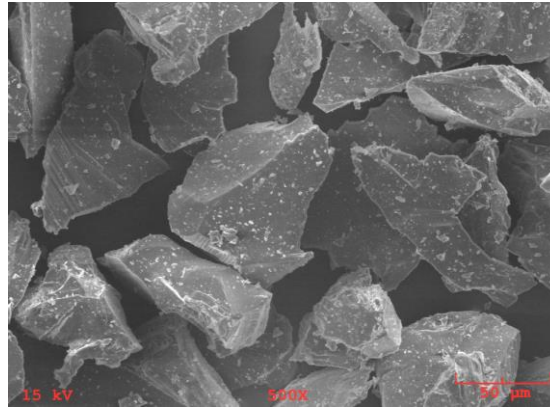


(b)

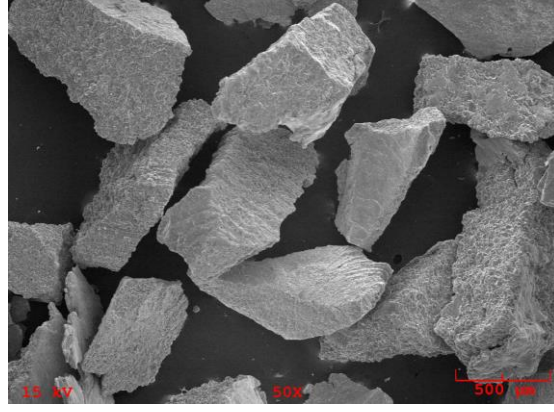
Şekil 4.3: AISI1060'ın ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.

4.1.2 Kullanılan Aşındırıcı Parçacıklar

Bu çalışmada iki farklı aşındırıcı parçacık kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla, 70µm boyuta, 1875 Vickers sertliğe ve 3,96 gr/cm³ yoğunluğa sahip açısall Al₂O₃ parçacıkları (Şekil 4.4) ile, 420µm boyuta, 547 Vickers sertliğe ve 7,85 gr/cm³ yoğunluğa sahip açısall martenzitik çelik grit parçacıklarıdır (Şekil 4.5).



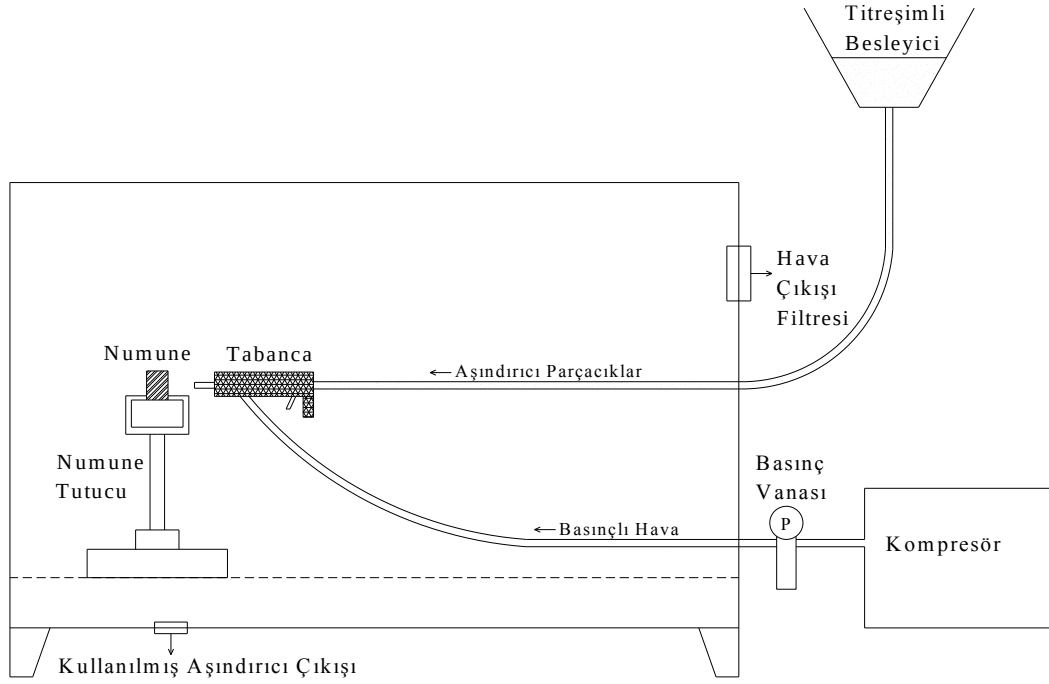
Şekil 4.4: Bu çalışmada kullanılan Al₂O₃ parçacıklarının SEM görüntüsü



Şekil 4.5: Bu çalışmada kullanılan martenzitik çelik gritlerin SEM görüntüsü

4.1.3 Deney Düzenegi

Erozif aşınma deneylerinde kum püskürtme cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.6). Kum püskürtme kabini ve püskürtme tabancasından oluşan sisteme laboratuvar tipi bir titreşimli aşındırıcı besleyici ve yüksek basınçta hava sağlayan kompresör bağlantısı yapılmıştır. Titreşimli besleyicinin frekans ayarları sayesinde dakikada beslenecek aşındırıcı miktarı yani parçacık akısı (particle flux) belirlenebilmektedir. Kompresörden gelen havanın basıncı, basınç vanası sayesinde ayarlanıp değişik basınç değerlerinde, dolayısıyla değişik hızlarda aşındırıcı püskürtmesi yapılabilmektedir. Numune tutucu mengene oynar başlıklı olup, değişik çarpma açılarında püskürtme yapılabilmesine imkan vermektedir.



Şekil 4.6: Erozif aşınma deney düzeneği.

4.2 Deneylerin Yapılması

4.2.1 Isıl İşlem Çalışmaları

Bu çalışmada kullanılan yüksek karbonlu alaşımsız AISI1060 çeliğine, yapının aşınma direncine etkisini incelemek amacıyla ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Orjinal halinin mikroyapısı ve de sertliği, çeliğin normalleştirilmiş (1060N olarak bahsedilecek) durumda olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada yapılan ısıtılma işlemleri, önce numunelerin 830°C'ye ısıtılıp, fırında yavaşça soğutulularak yapılan yumuşatma tavlamasını (1060Y), sonrasında 820°C'ye ısıtıp su vererek sertleştirme işlemini (1060S), ardından da 450°C (1060T4), 550°C (1060T5) ve 650°C'de (1060T6) temperlenmelerini kapsar. Sadece yumuşatma tavlaması yapılan, yumuşatma tavlama sonrasında su verilip temperlemeye sokulmayan ve de üç farklı sıcaklıkta temperleme yapılan numuneler ayrı ayrı aşınma deneylerine sokulmuş, böylece tüm farklı ısıtılma işlemlerinin, erozif aşınmaya etkisinin belirlenmesi sağlanmıştır.

Isıl işlem için elektrik dirençli fırın kullanılmıştır. Paslanmaz çelik bir kap içerisine yerleştirilen numunelerin üzerlerine grafit toz dökülerek işlem sırasındaki

oksitletmenin önüne geçilmiştir. Yumuşatma tavlama için malzemeler 830°C'deki fırına yerleştirilip 3 saat boyunca bu sıcaklıkta tutulmuşlar, sonrasında da fırında soğumaya bırakılmışlardır.

Yumuşatılan numuneler daha sonra sertleştirme işlemi için 820°C'ye ısıtılarak 2 saat boyunca ostenit dönüşüm sıcaklığı üzerindeki bu sıcaklıkta tutulmuş ve de su ile su verilerek sertleştirilmişlerdir.

Su verilip sertleştirilmiş numunelerin bir kısmının kırılmalıklarını azaltıp daha tok bir yapı elde etmek ve de bu işlemin aşınma direnci açısından etkisini incelemek için temperleme işlemi yapılmıştır. Temperleme sıcaklıkları olarak 450°C, 550°C ve 650°C seçilmiş, temperleme süresi de 1 saat olarak kullanılmıştır.

Tüm ısı işlemleri görmüş malzemelerin sertlik değerleri ve mikroyapı görüntüleri 5. bölümde verilmişlerdir. Ayrıca malzemelerin ASTM E23-05 standardına [30] göre yapılmış darbe testi değerleri de 5. bölümde verilmişlerdir.

4.2.2 Eroziyon Aşınma Deneyleri

Eroziyon aşınma deneyleri için standart bir yöntem ASTM tarafından belirtilmiştir [31]. Fakat bu yöntem, aşınma deneyi yapmak isteyenler için sadece bir yol gösterici olup deney koşulları bakımından zorunluluk teşkil etmez. Parçacık çarpma hızı, açısı, akışı, numune boyutu, nozul tipi gibi deney koşulları literatürdeki tüm çalışmalarda farklılık göstermiş olup, yapılan çalışmalarda bu koşulların açık olarak belirtildiği görülmüştür.

Bu çalışmada, çelik malzemeler 30mm x 40mm x 8mm (HARDOX400), 30mm x 50mm x 8mm (HARDOX500) ve 30mm x 50mm x 4mm (AISI1060) boyutlarında kesilmiş, yüzeyleri sırasıyla 120 grit ve 400 grit zımpara ile düzeltilmiş ve izopropil alkol ile temizlendikten sonra 0.1 mg hassasiyetle tartılarak aşınma deneylerine başlanmıştır. Alümina ve çelik grit aşındırıcılar her püskürtme öncesi titreşimli besleyiciye 100 gram olarak doldurulmuş ve her püskürtmede sabit bir besleme hızı (100 g/dk) kullanılmıştır. Besleme hızını ayarlamak için laboratuvar tipi titreşimli besleyici kullanılmıştır. Her püskürtme sonrası numune önce kuru hava ile temizlenmiş, daha sonra izopropil alkol ile yıkanıp kurutulduktan sonra 0,1 mg hassasiyetle tartılarak ağırlık kaybı ölçülmüştür. Çarpma hızı, cihaza giren havanın

basıncı ile kontrol edilmiştir. Yapılan çalışmalarda hız tespiti için Ruff ve Ives'in 1975 yılında geliştirdiği "double disk" metodu kullanılmıştır [32]. Deney koşulları ayrıca Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3: Bu çalışmada uygulanmış deney koşulları

Malzemeler	1060N, 1060Y, 1060S, 1060T4, 1060T5, 1060T6, HARDOX400, HARDOX500
Parçacıklar	70µm 1875HV Al ₂ O ₃ , 547HV 420µm çelik grit
Çarpma açıları	30°, 60°, 90°
Çarpma hızları	57m/s, 76m/s, 95m/s
Parçacık besleme hızı	100 g/dk
Nozul	4mm iç çaplı Al ₂ O ₃
Nozul-hedef arası	10mm
Sıcaklık	Oda sıcaklığı
Ağırlık kaybı ölçüm hassasiyeti	0,1mg

5. SONUÇLAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan çalışmalarda, normalleştirilmiş, yumuşatılmış, sertleştirilmiş, 450°C’de temperlenmiş, 550°C’de temperlenmiş ve 650°C’de temperlenmiş olmak üzere altı farklı yapıda AISI1060 çeliği ve de HARDOX400 ve HARDOX500 ticari aşınma plakaları olmak üzere sekiz farklı malzemenin erozif aşınma deneyleri yapılmış ve malzemelerin aşınma dirençleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için tüm malzemeler aynı hızda (57 m/s) çarpan alümina aşındırıcı parçacıklar ile, 30° ve de 90°’lik püskürtme açıları ile aşındırılmışlardır. Her numune için 100’er gram aşındırıcı kullanılmıştır. Eroziyon aşınma mekanizmalarının açıya bağlı olarak değiştiği ve de sünek malzemelerin en çok 30° civarı açılarda aşındığı, kırılkan malzemelerin ise en çok 90° civarı dik açılarda aşındığı bilindiği için tüm malzemeler bu iki farklı koşulda aşındırılmışlardır.

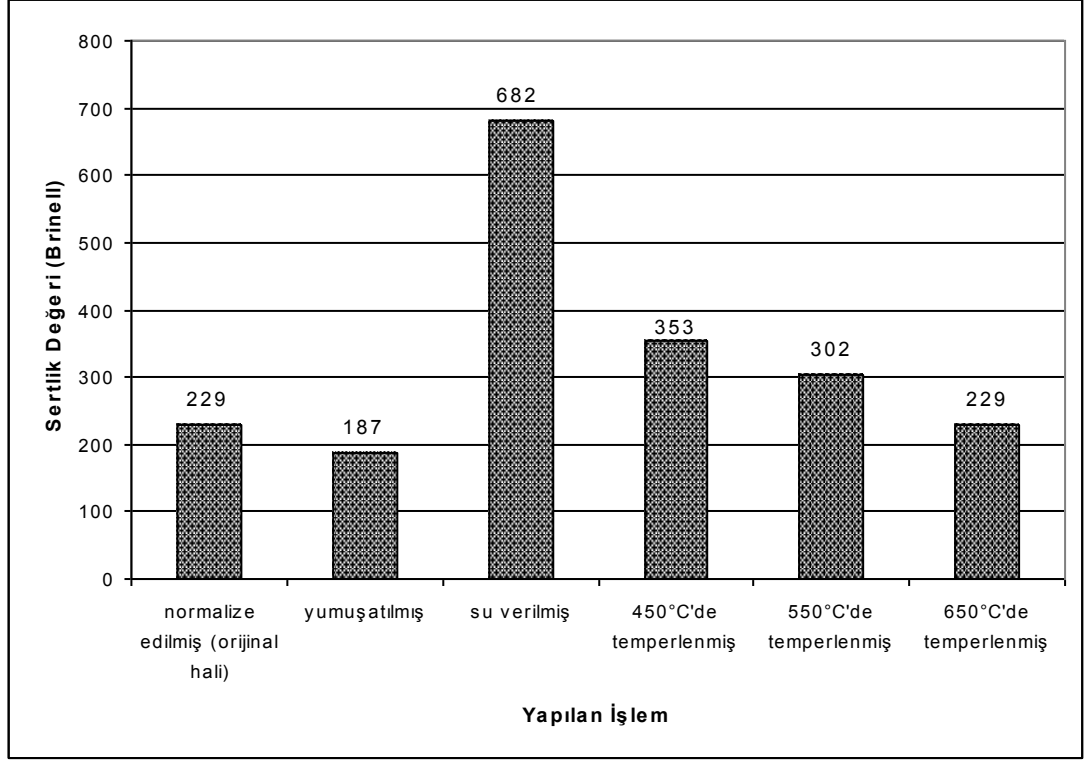
Aynı zamanda erozif aşınmanın bağlı olduğu diğer parametrelerin ve de mekanizmalarının incelenmesi amacıyla normalleştirilmiş AISI1060 çeliği üç farklı hızda (57 m/s, 76 m/s ve 95 m/s), üç farklı açıda (30°, 60° ve 90°) ve de iki farklı aşındırıcı ile (Al_2O_3 ve martenzitik çelik grit) ile aşındırılmıştır.

5.1 Isıl İşlem Sonrası Malzeme Karakterizasyonu

5.1.1 Sertlik Değerleri

AISI1060 çeliğine aşınma direncini geliştirmek amacıyla yapılan ısıtma işlemleri sonrası oluşan malzemelerin sertlik değerleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Normalleştirilmiş orijinal halinin 229 HB olan sertliği, yumuşatma işlemi sonrası 187 HB’ye düşerken, su verme işlemi ile su verme sonrası 682 HB’ye çıkmıştır. Bu yüksek sertlik değeri malzemede yüksek oranda martenzit dönüşümünün gerçekleştiğini göstermektedir.

Yapılan temperleme işlemleri sonucunda, 450°C’de temperlenen malzemenin sertliği 353 HB, 550°C’de temperlenen malzemenin sertliği 302 HB ve 650°C’de temperlenen malzemenin de sertliği 229 HB olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.1: AISI1060 çeliğinin yapılan ısı işlemler sonrasındaki sertlik değerleri

5.1.2 Darbe Enerjileri

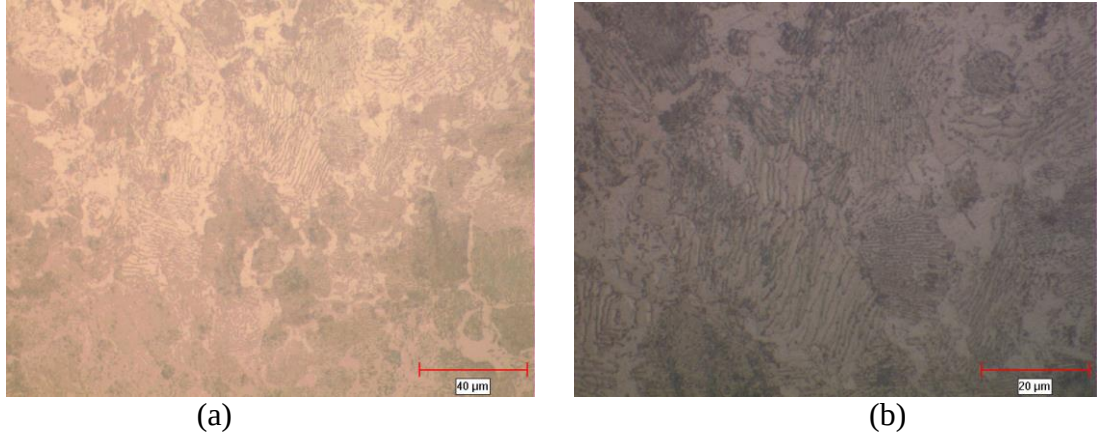
Malzemelerin tokluk değerlerinin erozif aşınma dirençlerindeki etkisinin belirlenebilmesi için orijinal haldeki, su verilmiş ve de su verilmiş 550°C’de temperlenmiş 1060 çelikleri ile HARDOX500 çeliğine ASTM E23-05 standardına göre Charpy tipi darbe testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5.1: Dört farklı malzemenin darbe enerjileri ve sertlik değerleri

	Sertlik	Darbe Enerjisi
Orjinal 1060	229 HB	20 Joule
Su verilmiş 1060	682 HB	10 Joule
Su + 550°C temperlenmiş 1060	302 HB	73 Joule
HARDOX500	478 HB	83 Joule

5.1.3 Mikroyapı İncelemeleri

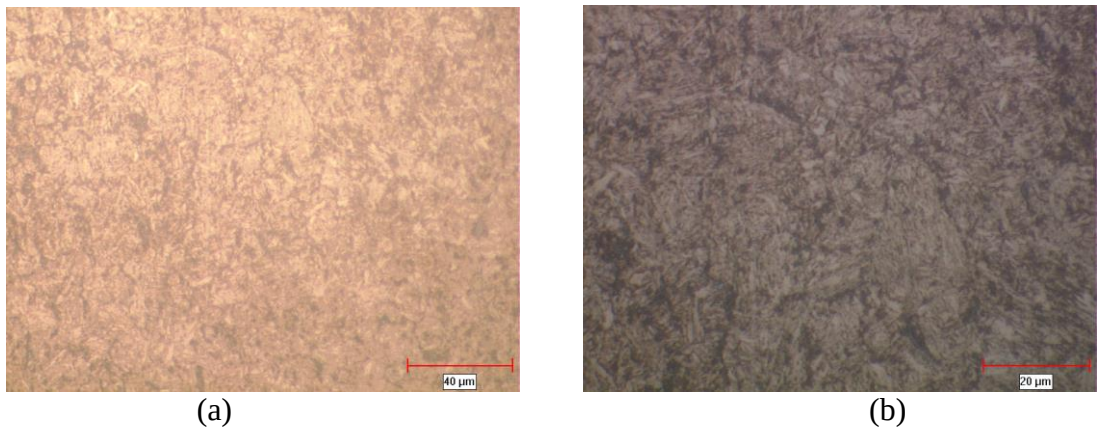
Isıl işlemler sonucu AISI1060 çeliğinde oluşan farklı mikroyapıların görüntüleri Şekil 5.2-Şekil 5.6’da verilmiştir. Yapılan bu metalografik çalışmalarda dağlayıcı olarak %2.5’luk nital çözeltisi kullanılmıştır.



Şekil 5.2: Yumuşatılmış AISI1060 çeliğinin ışık mikroskobunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

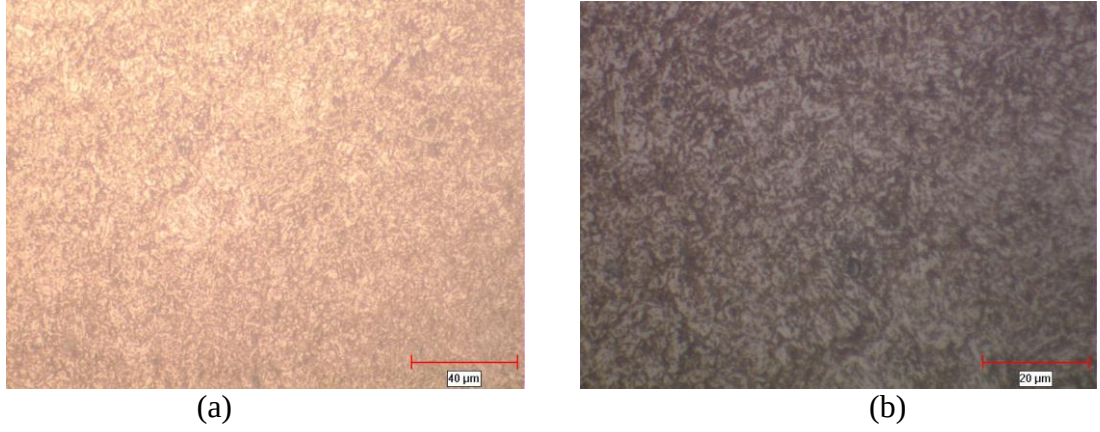
Şekil 5.2’de görülen yumuşatılmış AISI1060 çeliğinin yapısı ferrit ve perlitten oluşmaktadır. Çeliğin orijinal hali ile karşılaştırıldığında (Şekil 4.3), yumuşatılmış yapıda perlitin tamamen lamel şeklinde mevcut olduğu görülmektedir.

Su verilip sertleştirilmiş malzemenin mikroyapı görüntülerinde (Şekil 5.3), malzemenin tamamen martenzitik yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3: Su verilmiş AISI1060 çeliğinin ışık mikroskobunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.

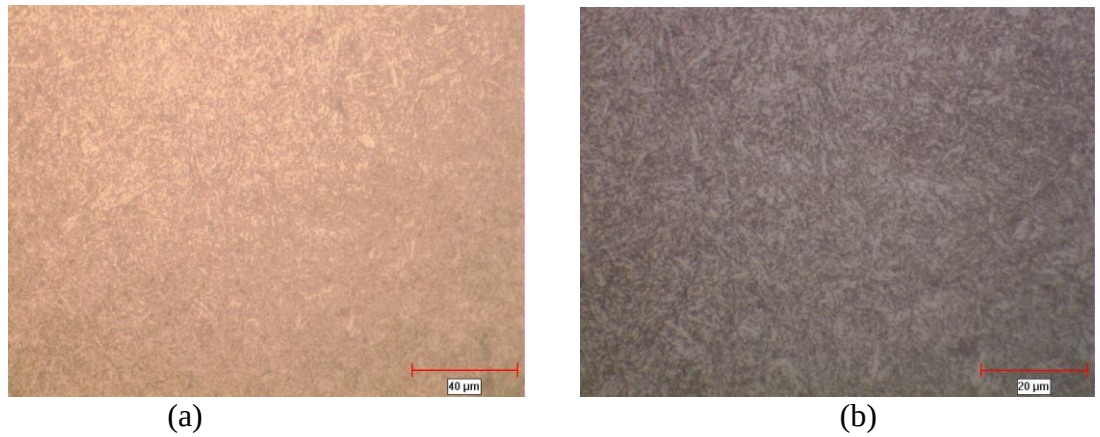
İğnesel martenzit tanelerine sahip olan bu yapının, 450°C’de 1 saat temperlendikten sonra sahip olduğu mikroyapıları ise Şekil 5.4’te gösterilmiştir.



Şekil 5.4: 450°C’de temperlenmiş AISI1060 çeliğinin ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

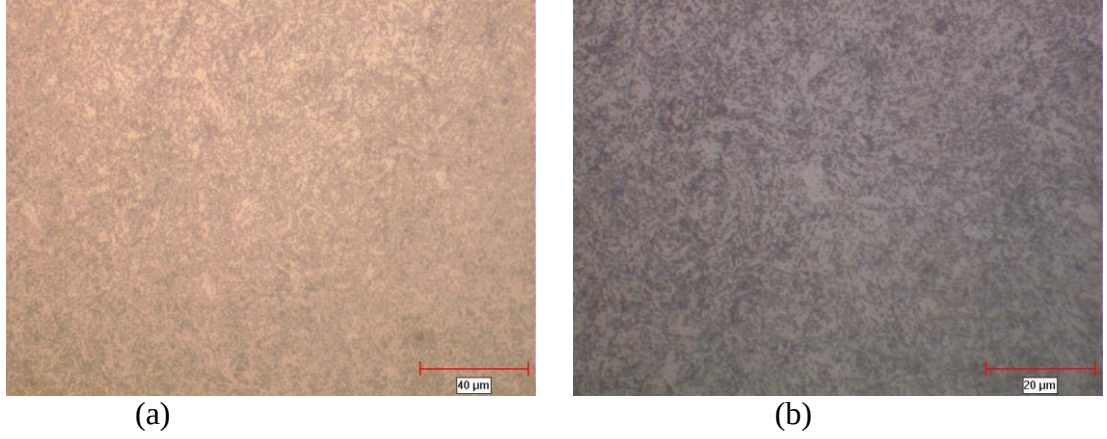
Temperleme işlemi sonucunda martenzit tanelerinin iğneli yapısı bir miktar dağılmış ve de mikroyapı temperlenmiş martenzite dönüşmüştür.

Su verilmiş AISI1060 çeliğinde 550°C’de 1 saat sürede temperleme ile oluşan mikroyapılar Şekil 5.5’te verilmiştir. Temperleme sıcaklığının artması ile sertliği daha da düşen malzemenin mikroyapısından, martenzitik yapının daha fazla dağıldığı görülmektedir.



Şekil 5.5: 550°C’de temperlenmiş AISI1060 çeliğinin ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri

Çalışmalarda kullanılan en yüksek temperleme sıcaklığı olan 650°C’de 1 saat temperlenmiş AISI1060 çeliğinin mikroyapı görüntüleri Şekil 5.6’da verilmiştir. Sıcaklığın daha da yükselmesine bağlı olarak, malzemedeki iğnesel martenzitik yapının tamamen bozulduğu ve ferrit fazının oluşmaya başladığı görülmektedir.

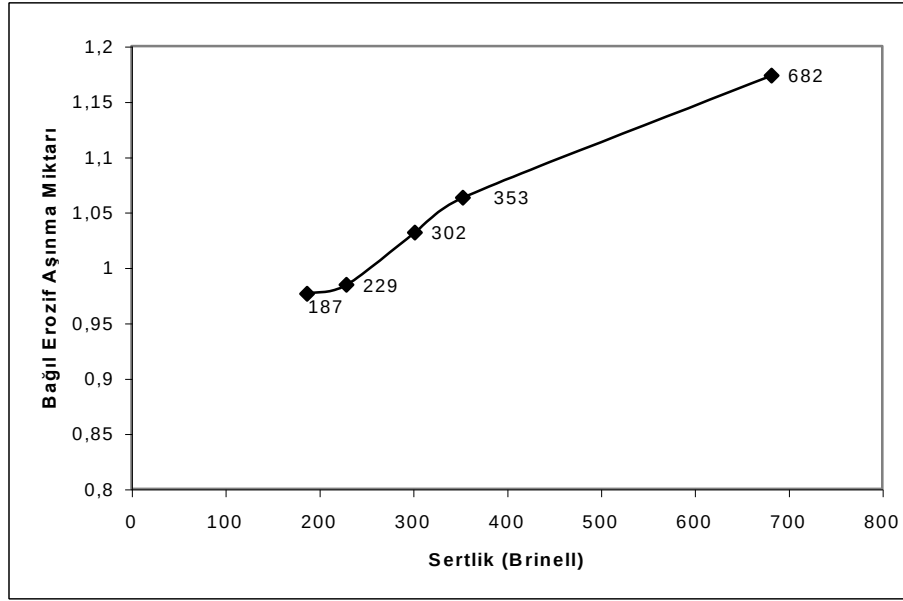


Şekil 5.6: 650°C’de temperlenmiş AISI1060 çeliğinin ışık mikroskopunda elde edilen iki farklı büyütmedeki mikroyapı görüntüleri.

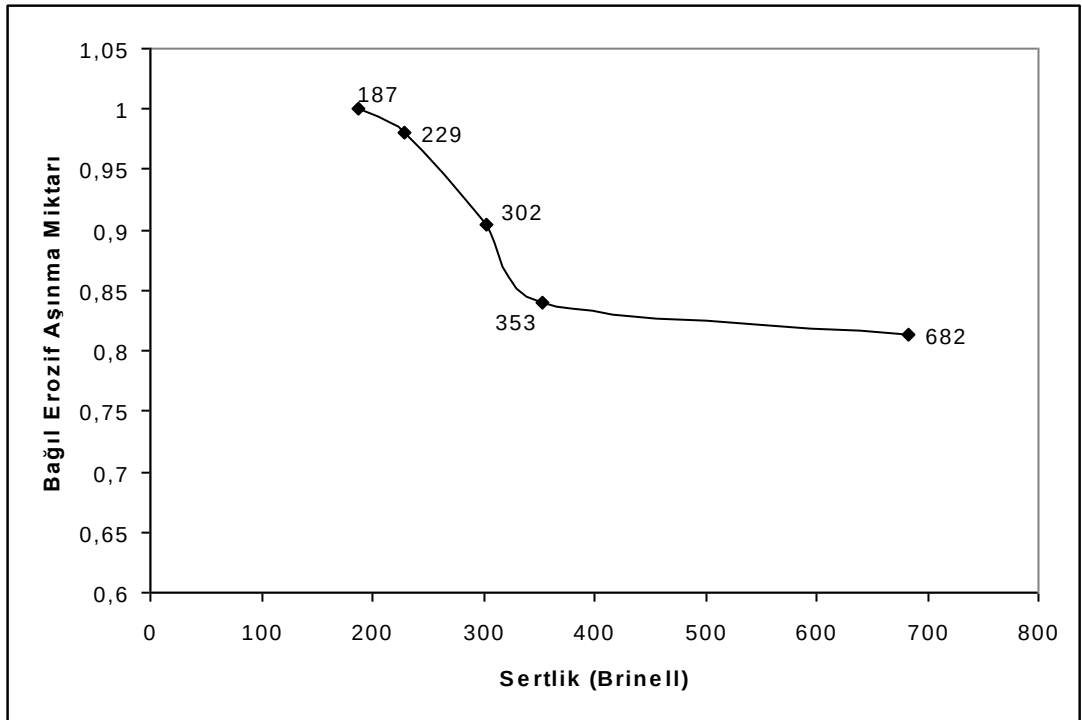
5.2 Aşınma Deneylerinin Sonuçları

5.2.1 Malzeme Sertliğine Göre Aşınma Miktarları

Yapılan ısı işlemler sonucunda beş farklı sertlik değerlerine sahip AISI1060 çeliği kullanılarak yapılan aşınma deneylerinin sonuçları olarak bağıl aşınma miktarının sertlikle değişimi iki farklı çarpma açısı için Şekil 5.7 ve 5.8’de verilmiştir. Malzemelerin 90°’deki erozif aşınma miktarları, malzemelerin sertliği ile artmaktadır (Şekil 5.7). En düşük sertliğe (187 HB) sahip 1060 çeliğinden, sertleştirilmiş 1060 çeliğine (682 HB) kadar, sertliğin artışıyla erozif aşınma miktarı, aşağı yukarı düzenli şekilde artmıştır. Dik açıdaki erozif aşınma koşulunda, malzeme sertliği ile aşınma direncinin ters orantılı olduğu literatürlerde de belirtilmektedir [4]. Dolayısıyla sertleştirilmiş ancak temperlenmemiş, 682 HB sertlik değerine sahip 1060 çeliği dik açıda erozif aşınmaya en dayanıksız malzemedir. 90°’deki en yüksek aşınma direnci yumuşatılmış 1060 çeliği göstermiştir. Yumuşak malzemelerin dik açıda daha yüksek aşınma direnci göstermeleri, bu malzemelerin çarpan aşındırıcı parçacığın enerjisini sönümleme kapasitelerinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Malzemelerin 30°’deki bağıl erozif aşınma miktarları, sertliklerine bağlı olarak Şekil 5.8’te gösterilmiştir.



Şekil 5.7: Malzemelerin 90°’deki erozif aşınma dirençlerinin sertliklerine göre sıralanmaları, 1060Y: 187HB, 1060T6: 229HB, 1060T5: 302HB, 1060T4: 353HB, 1060S: 682HB (Normalleştirilmiş 1060 çeliğinin bağıl erozif aşınma direnci 1 olarak kabul edilmiştir)

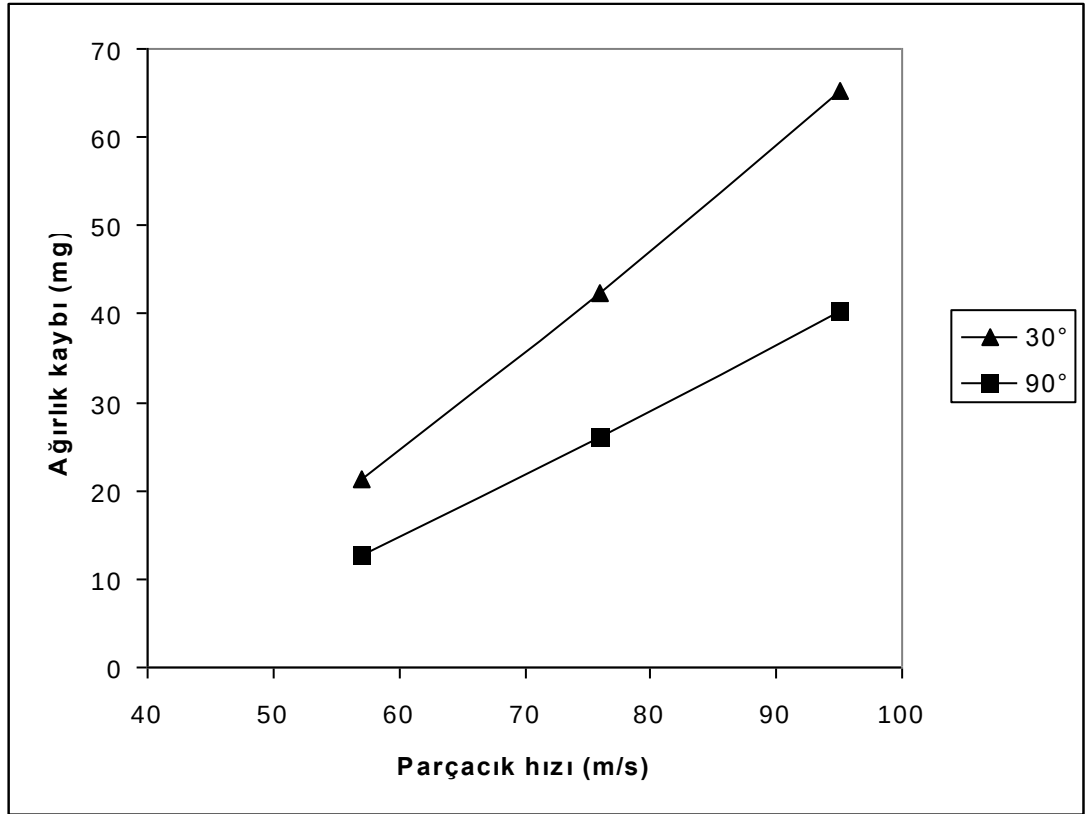


Şekil 5.8: Malzemelerin 30°’deki aşınma dirençlerinin sertliklerine göre sıralanmaları 1060Y: 187HB, 1060T6: 229HB, 1060T5: 302HB, 1060T4: 353HB, 1060S: 682HB (Normalleştirilmiş 1060 çeliğinin bağıl erozif aşınma direnci 1 olarak kabul edilmiştir)

30°'lik eğik çarpma açısında, malzemelerin erozif aşınma miktarları sertlik artışına bağlı olarak azalmaktadır. Ancak yüksek sertlik değerlerinde değişim daha azdır. Şekil 5.8'de görüldüğü gibi 682 HB sertlik değerine sahip malzemenin bağıl erozif aşınma miktarı, 353 HB sertlik değerine sahip olan malzemeninkine yakındır. Eğik açılardaki çarpma koşullarında çeliklerin sertleştirilerek erozif aşınmaya daha dirençli hale getirilebileceği literatürlerde belirtilmektedir [4].

5.2.2 Parçacık Çarpma Hızının Erozif Aşınmaya Etkisi

Bir malzemenin erozif aşınma miktarını belirleyen, aşındırıcı parçacığa bağlı en önemli parametrelerden biri olan, parçacık çarpma hızının aşınma miktarına etkisini incelemek amacıyla, normalleştirilmiş AISI1060 çeliği üç farklı parçacık hızında (57 m/s, 76 m/s, 95 m/s) aşındırılmıştır. Şekil 5.9'te görüldüğü gibi parçacık hızının artması ile erozif aşınma miktarında oldukça yüksek bir artış oluşmaktadır.

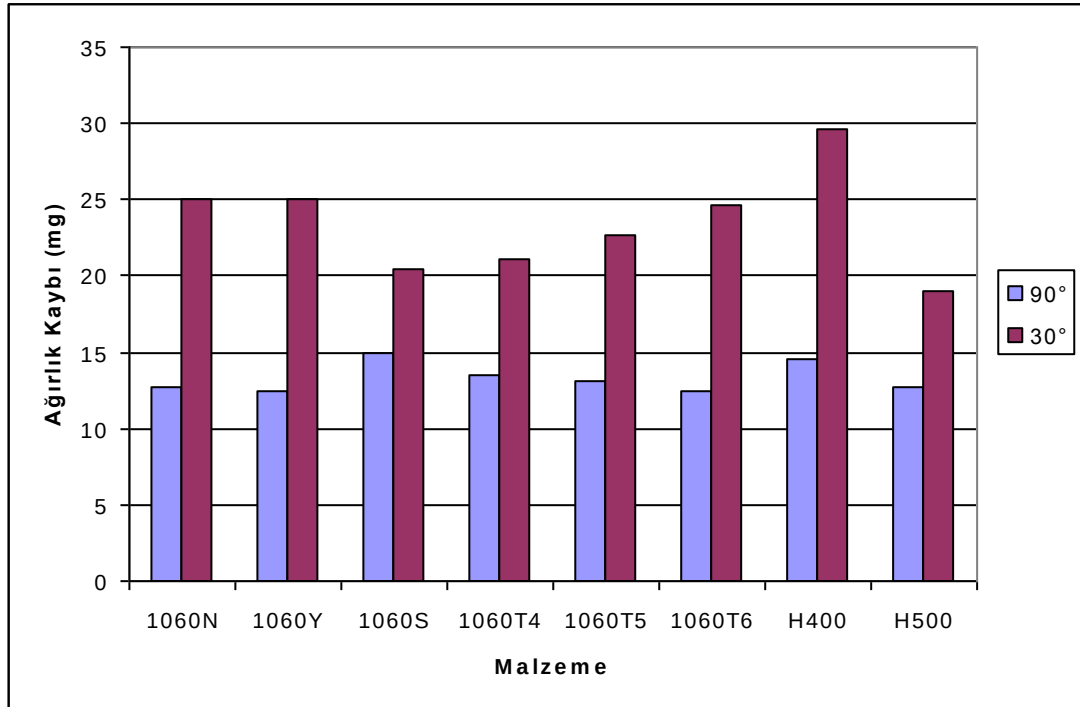


Şekil 5.9: Aşındırıcı parçacığın çarpma hızına bağlı olarak erozif aşınma miktarındaki değişim.

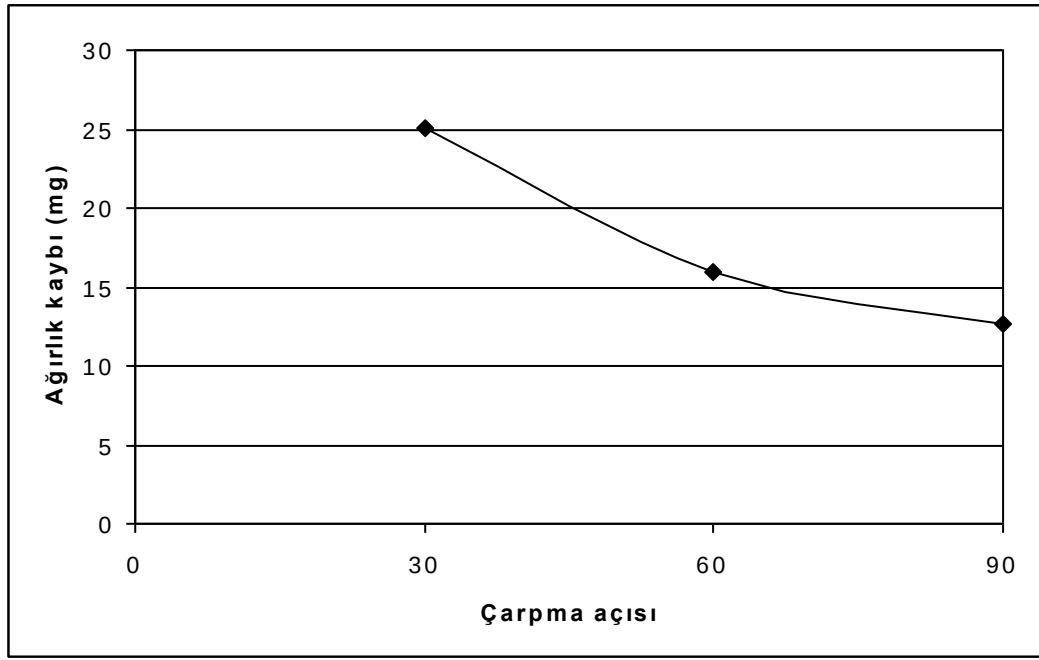
30° ve 90° için oluşan eğrilerin eğimleri karşılaştırılırsa, 30° çarpma açısında, malzemenin erozif aşınma değerinin, aşındırıcı parçacık hızının artmasına bağlı olarak, 90°'ye göre daha yüksek bir oranda arttığı görülür.

5.2.3 Parçacık Çarpma Açısının Eroziyon Aşınmaya Etkisi

Eroziyon aşınmanın mekanizmasını belirleyen en önemli parçacık parametresi olan, parçacık çarpma açısının aşınma miktarına etkisini incelemek amacıyla normalleştirilmiş AISI1060 çeliği üç farklı parçacık çarpma açısında (30° , 60° ve 90°) aşındırılmıştır. 100 gram aşındırıcının çarpması sonucu malzemelerin gösterdiği ağırlık kaybı miktarlarıyla oluşturulan Şekil 5.10'daki diyagramdan görüldüğü gibi malzemelerin hepsi 30° 'de, 90° 'ye göre daha yüksek miktarlarda aşınmışlardır. Bu sonuçlar malzemelerin sünek eroziyon aşınma karakterini gösterdiklerini ifade etmektedir. Açığa bağlı eroziyon aşınma miktarını daha detaylı olarak göstermek için, 30° ve 90° dışında bir ara değerde, normalleştirilmiş 1060 çeliği ile 60° 'de aşındırma deneyleri yaparak Şekil 5.11'deki açığa bağlı aşınma eğrisi çıkarılmıştır.



Şekil 5.10: Parçacık açısına (30° ve 90°) bağlı olarak malzemelerin eroziyon aşınma dirençlerinin karşılaştırılması



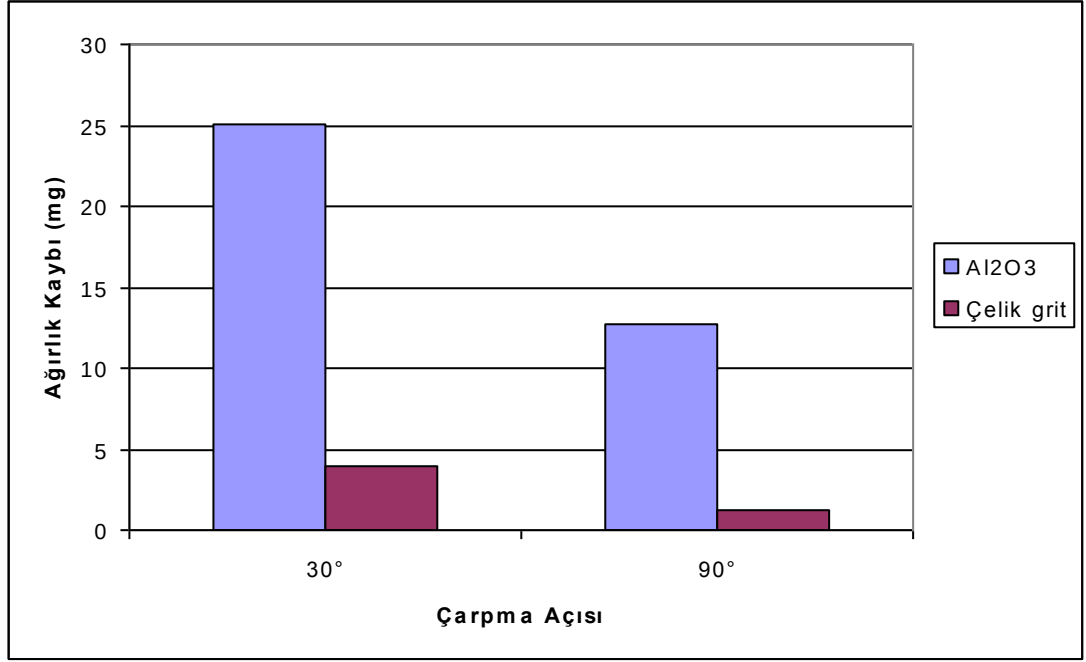
Şekil 5.11: AISI1060 çeliğinin erozif aşınma direncinin parçacık çarpma açılarına göre değişimi (parçacık çarpma hızı 57 m/s)

Şekil 5.11’de görülen eğriye göre, 30°, 60° ve 90° çarpma açılarındaki ağırlık kayıpları karşılaştırılsa, 30 derecede en yüksek aşınma değeri elde edilirken, açının büyümesi ile malzemedeki ağırlık kayıpları azalmakta ve de 90 derecede en az değere ulaşmaktadır. Bu değişim, sünek malzemelerin erozif aşınma davranışları ile ilgili literatürdeki sonuçlar ile uyumludur [4].

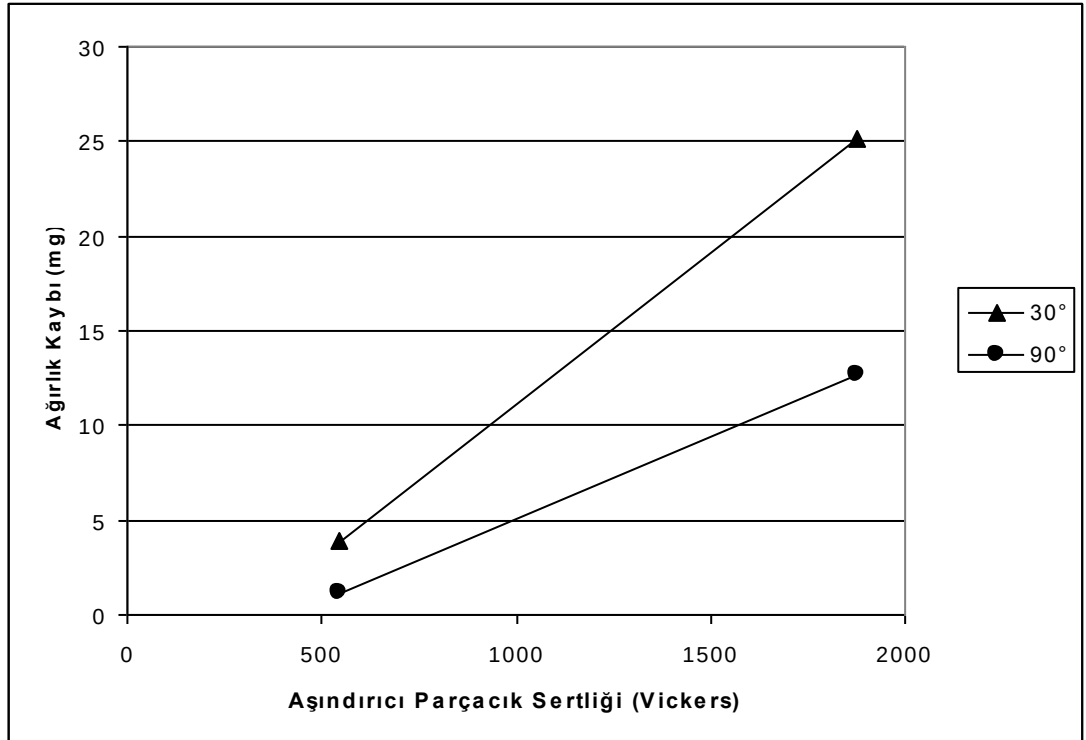
5.2.4 Aşındırıcı Parçacık Türünün Erozif Aşınmaya Etkisi

Aşındırıcı parçacık türünün erozif aşınmaya etkisini incelemek amacıyla normalleştirilmiş AISI1060 çeliğine, çalışmalarda temel olarak kullanılan Al_2O_3 aşındırıcı parçacıkların dışındaki martenzitik çelik gritler aşındırıcı olarak püskürtülmüştür. Al_2O_3 parçacıkları 70µm ortalama boyuta, 1875 Vickers sertliğe ve 3,96 gr/cm³ yoğunluğa sahipken, martenzitik çelik gritler 420µm ortalama boyuta, 547 Vickers sertliğe ve 7,85 gr/cm³ yoğunluğa sahiplerdir. Çelik grit ile yapılan çalışmada, aşınma miktarının alüminaya göre daha az olduğu görülmektedir (Şekil 5.12a-b). Parçacık boyutunun altı kat büyümesine rağmen, aşınma miktarının bu kadar düşmesinin nedeni, çelik gritlerin sertliğinin alüminanın yaklaşık dörtte biri kadar olmasından kaynaklanmaktadır. Aşındırıcı parçacık boyutundaki ve sertliğindeki bu değişimlere göre aşınma miktarındaki değişim dikkate alındığında, aşındırıcı parçacığın sertliğinin, aşınma hızını kontrol etmede parçacık boyutuna göre

daha etkili bir parametre olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç literatürle de uyumludur [4].



(a)



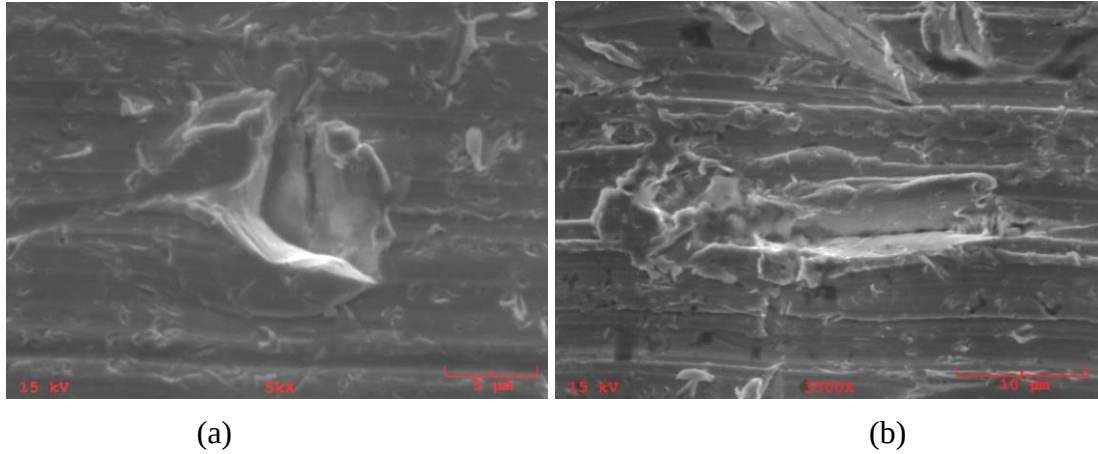
(b)

Şekil 5.12a-b: AISI1060 çeliğinin erozif aşınma direncinin parçacık türüne göre, 30° ve 90°'de değişimi

Şekil 5.12'deki diyagramlardan görüldüğü gibi, 30°'lik eğik açıdaki aşınma koşulunda, aşındırıcı parçacığın sertliğinin artması, aşınma miktarını 90°'ye göre daha çok arttırmaktadır.

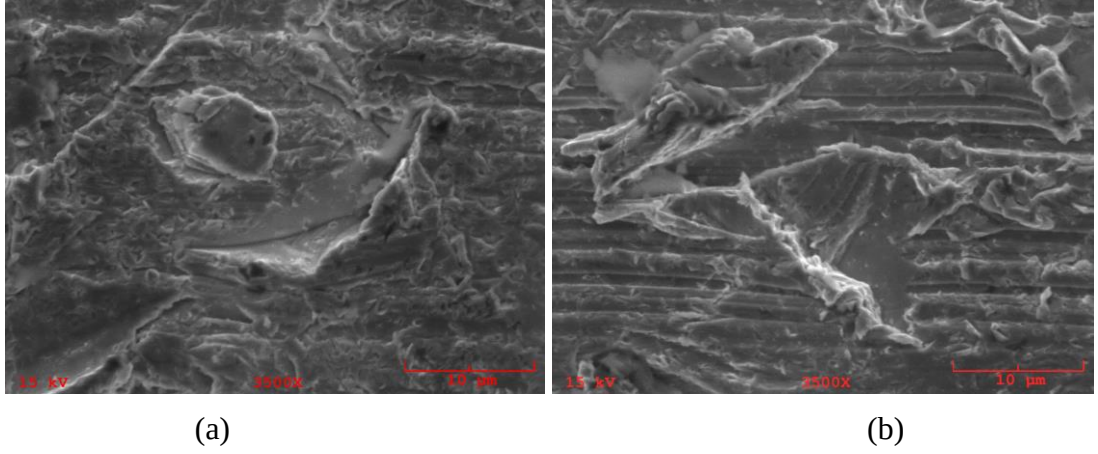
5.2.5 Aşınmış Yüzeylerin SEM ile İncelenmesi

Bu çalışmada erozif olarak aşındırılmış malzemelerin aşınma yüzeylerinin mikroskopik olarak inceleyebilmek, aşınma mekanizmaları hakkında bilgi edinebilmek için, aşındırılmış malzemelerin bir kısmının aşındırılmış yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Elde edilen SEM fotoğraflarında, yumuşak malzemelerde 30 derecelik eğik çarpmalarda yüzeyde yüksek oranlardaki deformasyonlarla parçacığın hareket yönünde çıkıntıların oluştuğu, sert malzemelerde ise 90 derecelik dik çarpmalarda malzeme yüzeyinde çatlama ve kırılma karakterli hasarların meydana geldiği görülmüştür (Şekil 5.13-5.17).



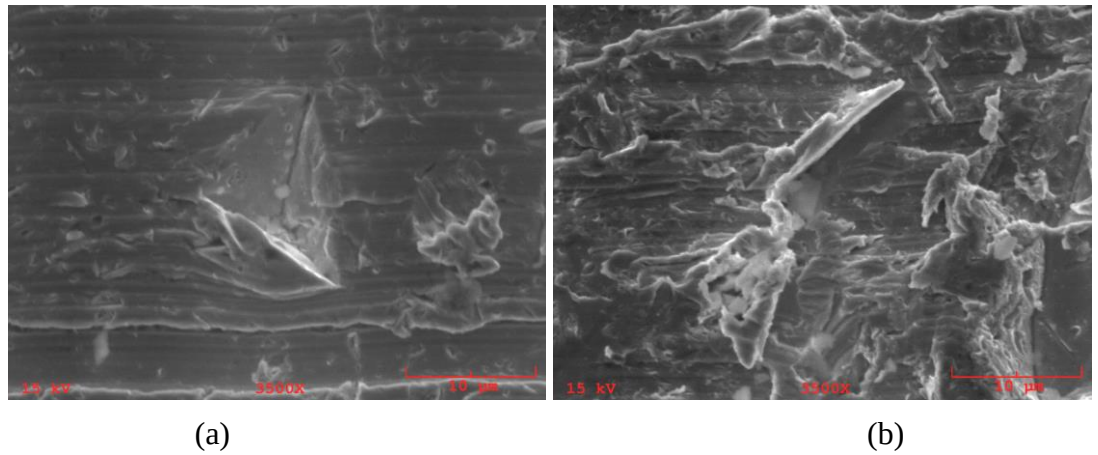
Şekil 5.13: Sertleştirilmiş AISI1060 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri

Sertleştirilmiş AISI1060 çeliğinde 90° açıyla çarpma ile oluşan erozif aşınma izlerinde (Şekil 5.13a) malzemenin üzerinde aşındırıcı parçacığın oluşturduğu çukur ve çukurun dibinde çatlak görülmektedir. Aynı malzemenin 30° çarpma açısıyla oluşan erozif aşınma izlerinde ise (Şekil 5.13b) parçacığın, hareket yönünde malzeme üzerinde oluşturduğu yarık ve yarığın iki yanında yükselen deformasyonlar görülmektedir.



Şekil 5.14: 550°C’de temperlenmiş AISI1060 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri

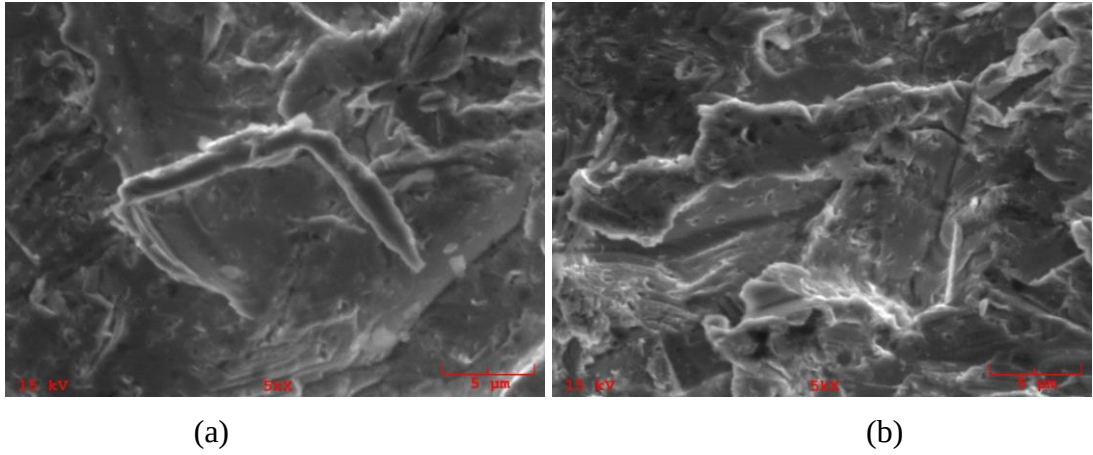
550°C’de 1 saat temperlenmiş AISI1060 çeliğinin aşındırıcının 90° açıyla çarpmasıyla oluşan erozif aşınma izlerinde (Şekil 5.14a), parçacığın dik şekilde malzeme yüzeyine bir miktar girerek ince uzun yarık şeklinde deformasyona neden olduğu görülmektedir. Aynı malzemede parçacığın 30° açıyla çarpması ile oluşturduğu erozif aşınma izlerinde ise (Şekil 5.14b) sağ taraftan gelen parçacığın malzeme üzerinde sıyırma şeklinde deformasyona yol açtığı görülmektedir.



Şekil 5.15: Yumuşatılmış AISI1060 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri

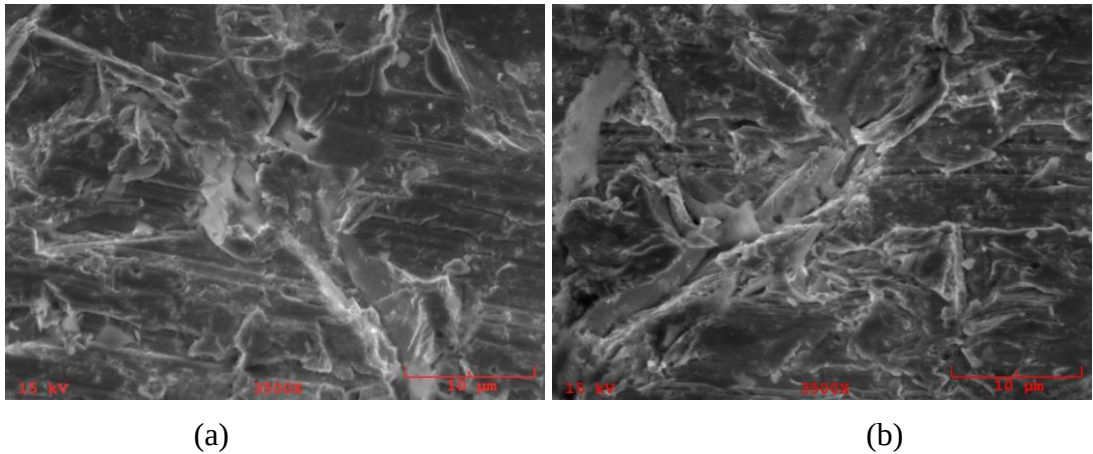
Fırında yavaş soğutma ile yumuşatılmış AISI1060 çeliğinde parçacığın 90° açıyla çarpması ile oluşan erozif aşınma izlerinde (Şekil 5.15a), parçacığın çarpma istikameti yönünde çukur olduğu ve çukurun içerisinde çatlaklar şeklinde deformasyon görülmektedir. Aynı malzemede parçacığın 30° açıyla çarpması ile oluşan erozif aşınma izlerinde ise (Şekil 5.15b) sağdan gelen parçacığın malzeme

yüzeyini sıyırması nedeniyle aşırı deformasyonla oluşmuş dudak şeklinde yükseltiller görülmektedir.



Şekil 5.16: HARDOX400 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri

HARDOX400 çeliğinde parçacığın 90° açıyla çarpması ile oluşan erozif aşınma izlerinde (Şekil 5.16a), parçacığın malzemeye girmesiyle etrafında yükseltiller şeklinde deformasyonlara neden olduğu ve çarptığı noktada ince bir çatlak oluşturduğu görülmektedir. Aynı malzemede parçacığın 30° açıyla çarpması ile oluşan erozif aşınma izlerinde ise parçacığın hareket yönünde sıyırmasının neden olduğu deformasyonların olduğu görülmektedir.



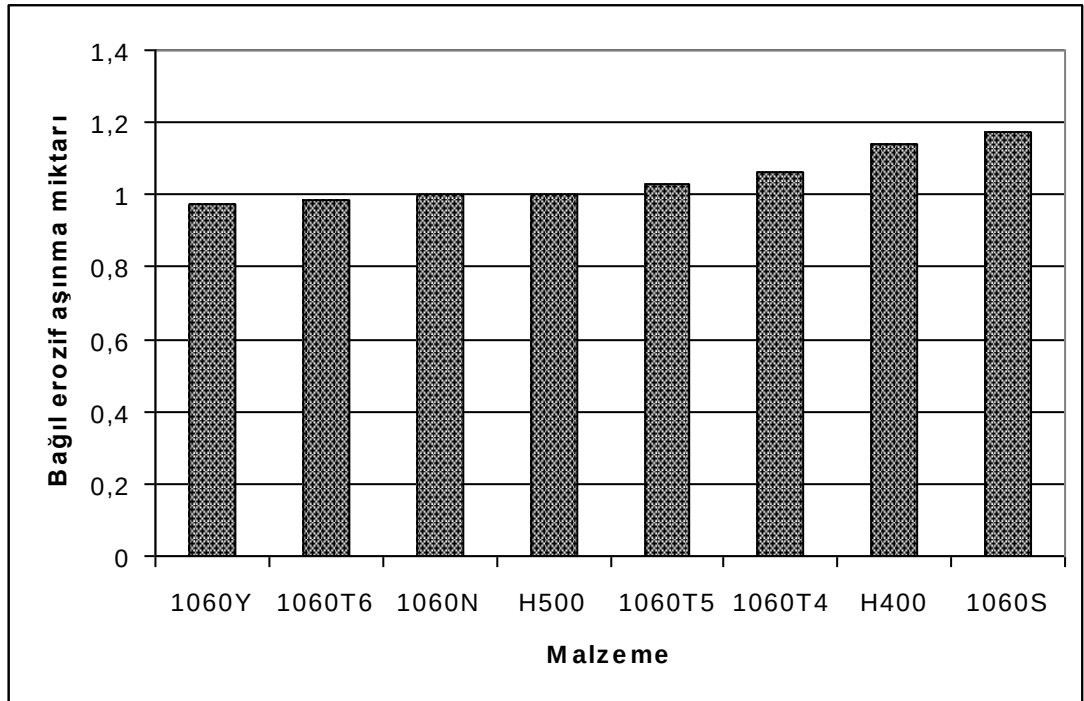
Şekil 5.17: Normalleştirilmiş 1060 AISI1060 çeliğinde 90°(a) ve 30°(b) çarpma sonucu oluşan aşınma izleri

Normalleştirilmiş AISI1060 çeliğinde parçacığın 90° açıyla çarpması ile oluşan erozif aşınma izlerinde (Şekil 5.17a) parçacığın çarpma istikameti yönünde çukur oluşturduğu ve yarıлма şeklinde deformasyonlar meydana geldiği görülmektedir.

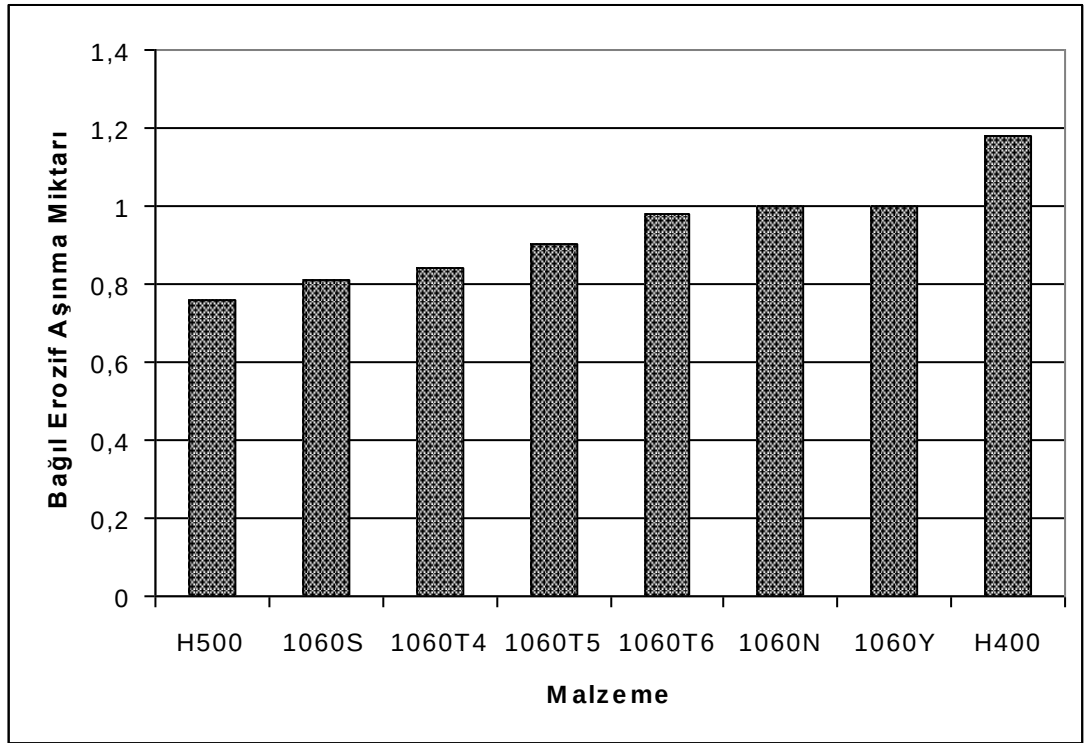
Aynı malzemede parçacığın 30° açıyla çarpması ile oluşan erozif aşınma izlerinde ise (Şekil 5.17b) parçacığın hareket yönü doğrultusunda yüzeyi yararak deformasyonlara neden olduğu görülmektedir.

5.3 Tüm Malzemelerin Aşınma Miktarlarının Karşılaştırılması

90° ve 30° çarpma açısında, 57 m/s çarpma hızında 100er gram Al_2O_3 ile aşındırılmış numunelerin ağırlık kayıp değerleri ölçülmüş ve daha kolay bir şekilde karşılaştırılmaları için 1060 çeliğinin normalize edilmiş halinin 100 gram Al_2O_3 parçacık ile aşındırılması sonucu oluşan toplam ağırlık kaybı değeri 1 olarak referans alınıp, diğer malzemelerin ağırlık kayıpları o değere orantılı olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerden oluşturulan bağıl erozif aşınma miktarları 90° çarpma açısı için Şekil 5.18’de, 30° çarpma açısı için ise Şekil 5.19’de gösterilmiştir.



Şekil 5.18: Malzemelerin 90° çarpma açısındaki bağıl erozif aşınma miktarları (Normalleştirilmiş 1060 çeliğinin bu koşuldaki aşınma miktarı 1 olarak kabul edilmiştir)



Şekil 5.19: Malzemelerin 30° çarpma açısındaki bağıl erozif aşınma miktarları (Normalleştirilmiş 1060 çeliğinin bu koşuldaki aşınma miktarı 1 olarak kabul edilmiştir)

Şekil 5.18’de görülmektedir ki 90° çarpma açısında erozif aşınmaya en yüksek direnci yumuşatılmış AISI1060 çeliği gösterirken (bağıl aşınma miktarı 0.98), en kötü direnci su verilip sertleştirilmiş AISI1060 çeliği göstermiştir (bağıl aşınma miktarı 1.17). Bu değerlere göre, yumuşatma işlemi sonucu 1060 çeliğininin bu koşuldaki erozif aşınma direnci %2 artmış, sertleştirme ile ise %17 oranında azalmıştır. Bu sonuç, dik açıda erozif aşınma durumunda yumuşak malzemelerin sert malzemelerden daha az aşındığı prensibi ile uyumludur.

Şekil 5.19’de görülmektedir ki 30° çarpma açısında erozif aşınmaya en yüksek direnci HARDOX500 çeliği (bağıl aşınma miktarı 0,76) göstermiştir. Ardından ikinci en yüksek direnci gösteren çelik sertleştirilmiş AISI1060 çeliğidir (bağıl aşınma miktarı 0,81). Bu koşuldaki en kötü direnci HARDOX400 çeliği göstermiştir (bağıl aşınma miktarı 1,18). 1060 çelikleri içinde bu koşuldaki en kötü aşınma direncini normalleştirilmiş ve yumuşatılmış 1060 çelikleri göstermişlerdir (ikisinin de bağıl aşınma miktarları 1). Bu değerlere göre, sertleştirme işlemi ile bu koşuldaki erozif aşınma direnci %19 artmıştır. Yapılan ısıt işlemler sonucu, 30° için, hiçbir 1060 çeliği ilk halinden daha düşük aşınma direnci göstermemiştir.

5.4 Değerlendirme

AISI1060 çeliğinin erozif aşınma direncini ısıt işlemler ile geliştirip karşılaştırmak amacıyla yapılan bu çalışma sonucu görülmüştür ki, temel iki farklı erozif aşınma durumu olan eğik çarpma ve de dik çarpmalarda farklı tipte malzemeler aşınmaya karşı daha yüksek direnç göstermektedirler. Bu sonuç literatür tarafından da kabul edilmektedir. Bu yüzden bir malzemenin erozif aşınma direncinin geliştirilmesi amaçlanmış ise, öncelikle malzemenin çalışma ortamında bir inceleme yapıp malzemenin daha çok hangi tip erozif aşınmaya maruz kaldığı belirlenmelidir. Malzeme daha çok 90° civarı dik çarpma şeklinde erozif aşınmaya maruz kalıyorsa, malzemeyi sertleştirirsenin bir faydası görülmez, aksine aşınma direncini düşürür. Dik çarpma durumunda daha yumuşak ve sünek malzeme seçimi gerekmektedir. Malzeme çoğunlukla 30° civarı eğik çarpma şeklinde erozif aşınmaya maruz kalıyor ise malzemeyi sertleştirerek aşınma direncini yükseltmek mümkündür.

5.5 Genel Sonuçlar

Yapılan çalışmaların sonuçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Yapılan ısıt işlemlerde, yumuşatma tavlama ile malzemede sıkı yapıda bulunan perlit yapısı lamelleşmiş (Şekil 5.2) ve malzemenin sertliği 229 HB'den 187 HB sertliğe düşmüştür. Su verilip sertleştirilen malzemenin sertliği 682 HB olarak ölçülmüş ve de mikroyapısının martenzitik olduğu görülmüştür (Şekil 5.3). Sertleştirilen malzemelere yapılan temperleme işlemleri sonucunda 450°C'de 1 saat temperlenen malzemenin sertliği 353 HB, 550°C'de temperlenen malzemenin sertliği 302 HB ve 650°C'de temperlenen malzemenin sertliği 229 HB olarak bulunmuştur. Temperlenmiş malzemelerin mikroyapılarının temperlenmiş martenzitik olduğu ve sıcaklığın yükselmesiyle birlikte iğnesel yapının bozulduğu görülmüştür (Şekil 5.4-Şekil 5.6).
2. Çarpma hızının artması ile erozif aşınma miktarı etkili olarak artmıştır (Şekil 5.9).

3. Aşındırıcı parçacığın sertliğinin aşınma hızına olan etkisi, parçacık boyutunun etkisinden çok daha fazladır (Şekil 5.12).
4. Eğik çarpmalarda malzeme üzerinde sıyrılma şeklinde deformasyonlarla malzemede dudak şeklinde yükselen çıkıntılar oluşmuş, dik çarpmalarda ise malzeme üzerinde çukurlar ve çatlaklar oluşmuştur (Şekil 5.13-Şekil 5.17).
5. Tüm malzemeler arasında yapılan karşılaştırmalar sonucu erozif aşınmaya en dirençli malzeme, 90° dik çarpma açısı ile aşındırma koşulları için, yumuşatılmış 1060 çeliği (Şekil 5.18), 30° eğik çarpma açısı ile aşındırma koşulları için, HARDOX500 çeliğidir (Şekil 5.19). 1060 çeliklerinden su verilip sertleştirilen çelik, 30° çarpma açısında en yüksek direnci göstermiştir.
6. Eğik açıda erozif aşınmaya maruz kalan bir malzemenin erozif aşınma direncini, malzemeyi sertleştirerek arttırmak mümkündür.
7. Dik açıda erozif aşınmaya maruz kalan bir malzemenin erozif aşınma direncini, malzemeyi daha sünek yaparak arttırmak mümkündür.

Malzemelerin 30 derecelik parçacık çarpma açısıyla, 90 dereceye göre daha çok aşınmaları, malzemelerin “sünek erozif aşınma” karakteri gösterdiklerini ifade etmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **G40-02**, 2002. Standart Terminology Relating to Wear and Erosion, *ASTM International*, US.
- [2] **ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Volume 20: Materials Selection, ASM International, US.
- [3] **Bahadur, S.**, 1996. Effect of Surface Coatings and Treatments on Wear, ASTM International, US.
- [4] **Stachowiak, G.W. and Andrew, W.B.**, 2001. Engineering Tribology, Butterworth Heinemann, US.
- [5] **ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication and Wear, ASM International, US.
- [6] **ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, US.
- [7] **Finnie, I.**, 1995. Some reflections on the past and future of erosion, *Wear*, **186-187**, 1-10.
- [8] **Oka, Y.I., Ohnogi, H., Hosokawa,T. and Matsumura. M.**, 1997. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact, *Wear*, **203-204**, 573-579.
- [9] **Levy, A.V.**, 1981. The solid particle erosion behavior of steel as a function of microstructure, *Wear*, **68**, 269-287.
- [10] **Mann, B.S.**, 1999. Solid-particle erosion and protective layers for steam turbine blading, *Wear*, **224**, 8-12.
- [11] **Mann, B.S. and Arya, V.**, 2001. Abrasive and erosive wear characteristics of plazma nitriding and HVOF coatings: their applications in hydroturbines, *Wear*, **249**, 354-360.
- [12] **Hidalgo, V.H., Varela, J.B., Menéndez, A.C. and Martinez, S.P**, 2001. High temperature erosion wear of flame and plasma-sprayed nickel-chromium coatings under simulated coal-fired boiler atmospheres,*Wear*, **247**, 214-222.
- [13] **Suckling, M. and Allen, C.**, 1997. Critical variables in high temperature erosive wear, *Wear*, **203-204**, 528-536.
- [14] **Immarigeon, J.P., Chow, D., Parameswaran, V.R., Au, P., Saari, H., and Koul, A.K.**, 1997. Erosion testing of coatings for aero engine compressor components, *Advanced Performance Materials*, **4**, 371-378.

- [15] **Arefi, B., Settari, A., and Angman, P.**, 2005. Analysis and simulation of erosion in drilling tools, *Wear*, **259**, 263-270.
- [16] **Iwai, Y., and Nambu, K.**, 1997. Slurry wear properties of pump lining materials, *Wear*, **210**, 211-219.
- [17] **Wood, R.J.K. and Wheeler, D.W.**, 1998. Design and performance of a high velocity air-sand jetimpingement erosion facility, *Wear*, **220**, 95-112.
- [18] **Wheeler, D.W. and Wood, R.J.K.**, 1999. Erosive wear behaviour of thick chemical vapour deposited diamond coatings, *Wear*, **225-229**, 523-536.
- [19] **Arnold, B.K., Heijkoop, T., Lloyd, P.G., Rubenis, G., and Sare, I.R.**, 1997. Wear of cast-bonded components in a coal pulveriser mill, *Wear*, **203-204**, 663-670.
- [20] **Lopez, D., Sanchez, C. And Toro, A.**, 2005. Corrosion-erosion behaviour of TiN-coated stainless steels in aqueous slurries, *Wear*, **258**, 684-692.
- [21] **Adler, T.A. and Doğan, Ö.N.**, 1999. Erosive wear and impact damage of high-chromium white cast irons WCI: white cast iron, *Wear*, **225-229**, 174-180.
- [22] **Hung, F.Y., Chen, L.H. and Lui, T.S.**, 2002. A study on the particle erosion of upper bainitic austempered ductile iron, *Wear*, **252**, 985-991.
- [23] **ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Volume 4: Heat Treating, ASM International, US.
- [24] **Sarı, N.Y. and Yılmaz, M.**, 2004. Investigation of abrasive + erosive wear behaviour of surface hardening methods applied to AISI 1050 steel, *Materials & Design*, **Article in press**
- [25] **Savaşkan, T.**, 1999. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon.
- [26] **Topbaş, M.A.**, 1998. Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı, Prestij Yayıncılık, İstanbul.
- [27] **Voort, G.F.V.**, 1991. Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels, ASM International, US.
- [28] **Chandler, H.**, 1995. Heat Treater's Guide – Practices and Procedures for Irons and Steels 2nd Edition, ASM International, US.
- [29] **Makina Kimya Endüstrisi Kurumu**, 1978. MKE Normu Özel Nitelikte Çelik Türleri Kataloğu, MKE Basımevi, Ankara.
- [30] **E23-05, 2005.** Standart test methods for notched bar impact testing of metallic materials, *ASTM International*, US.
- [31] **G76-04, 2004.** Standart test method for conducting erosion tests by solid particle impingement, *ASTM International*, US.

- [32] **Ruff, A.W. and Ives, L.K.**, 1975. Measurement of solid particle velocity in erosive wear, *Wear*, **35**, 195-199.

EK A

Tablo A.1: Normalleştirilmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri

Aşındırıcı	Çarpma hızı (m/s)	Çarpma açısı (°)	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık kaybı (mg)
Al ₂ O ₃	57	90	43,9382	43,9255	12,7
Al ₂ O ₃	57	60	44,1710	44,1550	16
Al ₂ O ₃	57	30	44,1923	44,1711	21,2
Al ₂ O ₃	76	90	44,2150	44,1889	26,1
Al ₂ O ₃	76	30	44,0690	44,0266	42,4
Al ₂ O ₃	95	90	43,9785	43,9381	40,4
Al ₂ O ₃	95	30	43,8545	43,7892	65,3
Çelik grit	57	90	44,1892	44,1880	1,2
Çelik grit	57	30	43,7895	43,7856	3,9

Tablo A.2: Yumuşatılmış 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri

Aşındırıcı	Çarpma hızı (m/s)	Çarpma açısı (°)	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık kaybı (mg)
Al ₂ O ₃	57	90	37,7777	37,7653	12,4
Al ₂ O ₃	57	30	37,5864	37,5613	25,1

Tablo A.3: Sertleştirilmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri

Aşındırıcı	Çarpma hızı (m/s)	Çarpma açısı (°)	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık kaybı (mg)
Al ₂ O ₃	57	90	37,6672	37,6523	14,9
Al ₂ O ₃	57	30	43,2787	43,2583	20,4

Tablo A.4: 450°C’de temperlenmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri

Aşındırıcı	Çarpma hızı (m/s)	Çarpma açısı (°)	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık kaybı (mg)
Al ₂ O ₃	57	90	36,5807	36,5672	13,5
Al ₂ O ₃	57	30	43,2802	43,2591	21,1

Tablo A.5: 550°C’de temperlenmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri

Aşındırıcı	Çarpma hızı (m/s)	Çarpma açısı (°)	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık kaybı (mg)
Al ₂ O ₃	57	90	37,4255	37,4124	13,1

Al ₂ O ₃	57	30	42,4095	42,3868	22,7
--------------------------------	----	----	---------	---------	------

Tablo A.6: 650°C’de temperlenmiş 1060 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri

Aşındırıcı	Çarpma hızı (m/s)	Çarpma açısı (°)	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık kaybı (mg)
Al ₂ O ₃	57	90	42,4862	42,4737	12,5
Al ₂ O ₃	57	30	43,2172	43,1926	24,6

Tablo A.7: HARDOX400 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri

Aşındırıcı	Çarpma hızı (m/s)	Çarpma açısı (°)	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık kaybı (mg)
Al ₂ O ₃	57	90	68,2136	68,1991	14,5
Al ₂ O ₃	57	30	68,1828	68,1532	29,6

Tablo A.8: HARDOX500 çeliğinin erozif aşınma deneylerindeki ağırlık kaybı değerleri

Aşındırıcı	Çarpma hızı (m/s)	Çarpma açısı (°)	İlk ağırlık (g)	Son ağırlık (g)	Ağırlık kaybı (mg)
Al ₂ O ₃	57	90	87,7493	87,7366	12,7
Al ₂ O ₃	57	30	87,7281	87,7091	19

EK B**Tablo B.1:** Sertlik dönüşüm tablosu

HB	HRA	HRB	HRC	HV
767	84,7		66,4	
757	84,4		65,9	
745	84,1		65,3	
733	83,8		64,7	
722	83,4		64,0	
712				
710	83,0		63,3	
698	82,6		62,5	
684	82,2		61,8	
682	82,2		61,7	
670	81,8		61,0	
656	81,3		60,1	
653	81,2		60,0	
647	81,1		59,7	
638	80,8		59,2	
630	80,6		58,8	
627	80,5		58,7	
601	79,8		57,3	715
578	79,1		56,0	671
555	78,4		54,7	633
534	77,8		53,5	599
514	76,9		52,1	572
495	76,3		51,0	547
477	75,6		49,6	523
461	74,9		48,5	501
444	74,2		47,1	479
429	73,4		45,7	459
415	72,8		44,5	441
401	72,0		43,1	424
388	71,4		41,8	409
375	70,6		40,4	395
363	70,0		39,1	382
352	69,3		37,9	369
341	68,7		36,6	356
331	68,1		35,5	344
321	67,5		34,3	332
311	66,9		33,1	321
302	66,3		32,1	310
293	65,7		30,9	299
285	65,3		29,9	290
277	64,6		28,8	282
269	64,1		27,6	274

Tablo B.1 devamı				
HB	HRA	HRB	HRC	HV
262	63,6		25,4	267
255	63,0		24,2	260
248	62,5		22,8	253
241	61,8	100,0	21,7	246
235	61,4	99,0	20,5	240
229	60,8	98,2	20,0	234
223		97,3	18,0	228
217		96,4	17,0	222
212		95,5	16,0	216
207		94,6	15,0	210
201		93,8		205
197		92,8		200
192		91,9		195
187		90,7		190
183		90,0		185
179		89,0		180
174		87,8		176
170		86,8		172
167		86,0		169
163		85,0		165
156		82,9		162
149		80,8		159
143		78,7		156
137		76,4		153
131		74,0		150
126		72,0		147
121		69,8		144
116		67,6		141
111		65,7		139

ÖZGEÇMİŞ

V. Erduran Erdem, 1980 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğretimini Büyük Esmâ Sultan İlkokulu'nda ve ortaöğretimini Nişantaşı Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 1998 yılında girdiği İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden 2003 yılında mezun olup aynı yıl İTÜ Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği yüksek lisans programına başladı. Halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.